



**С.А. БАРТАЛЕВ, В.А. ЕГОРОВ, В.О. ЖАРКО, Е.А. ЛУПЯН,
Д.Е. ПЛОТНИКОВ, С.А. ХВОСТИКОВ, Н.В. ШАБАНОВ**

СПУТНИКОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА РОССИИ

**МОСКВА
2016**

УДК 528.8

Подготовка и издание коллективной монографии осуществлено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00389) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук.

Рецензент: академик *А.С. Исеев*

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. - М.: ИКИ РАН, 2016. - 208 с.

ISBN 978-5-00015-006-1

В монографии обобщены результаты исследований и разработок Института космических исследований Российской академии наук по развитию методов картографирования растительного покрова России на основе данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Рассматриваются физические основы дистанционного зондирования растительного покрова в оптическом диапазоне, в том числе, методы, основанные на моделях переноса солнечного излучения. Дается описание особенностей разрабатываемых автоматизированных методов спутникового картографирования растительного покрова в масштабах страны. Описаны созданные к настоящему времени по данным дистанционного зондирования на территорию России тематические карты, предоставляющие информацию о пространственном распределении типов растительного покрова, породной структуры и запасов стволовой древесины в лесах, сельскохозяйственных земель. Анализируются возможности интеграции созданных спутниковых карт в глобальную модель динамики растительного покрова и ее региональной адаптации к условиям России, обеспечившей качественное повышение достоверности результатов моделирования и получение прогнозных оценок при различных сценариях изменения климата.

Монография адресована широкому кругу ученых и специалистов, аспирантов и студентов, занимающихся вопросами дистанционного зондирования растительного покрова, мониторинга состояния природных ресурсов и окружающей среды, биогеографии, геоэкологии, устойчивого управления лесными и земельными ресурсами, исследованиями в области глобальных изменений биосферы и климата.

Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Loupian E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N. Land cover mapping over Russia using Earth observation data. Moscow. Russian Academy of Sciences' Space Research Institute, 2016. - 208 p.

This book presents the results of research by the team of authors on development of approaches for land cover mapping over Russia using satellite remote sensing data. Physical principles of remote sensing of vegetation in the optical domain, including retrieval of biophysical parameters of vegetation using radiative transfer modelling are reviewed. The methods for country-wide automated land cover mapping using satellite remote sensing data are described. Remote sensing data derived maps of spatial distribution of land cover types, forest dominant tree species, stock volume, and extent of arable lands over Russia are presented. Utility of assimilation of remote sensing data derived land cover maps in the dynamic global vegetation model at a regional scale of Russia is analysed, and projections of the vegetation cover dynamic under various climate change scenarios are presented.

This book is addressed to a wide range of scientists, working professionals and graduate students in the field of remote sensing of vegetation cover, land and forest resources management, biogeography, geoecology, climate and biosphere global changes research.

УДК 528.8

Компьютерная верстка: *Бушмелева Е.В.*
Дизайн обложки: *Захаров А.Н.*

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1. Методология спутникового картографирования растительного покрова	11
1.1. Спутниковое картографирование как метод изучения растительного покрова	11
1.2. Спутниковые системы ДЗЗ для картографирования растительного покрова	16
1.3. Основные направления развития методологии спутникового картографирования растительного покрова России	22
Глава 2. Физические методы дистанционного зондирования растительного покрова в оптическом диапазоне	28
2.1. Принципы атмосферной коррекции данных ДЗЗ в оптическом диапазоне.....	28
2.2. Моделирование коэффициента спектральной яркости.....	37
2.3. Уравнение переноса солнечного излучения в растительном покрове	48
2.4. Обратная задача уравнения переноса для вычисления индекса листовой поверхности	60
2.5. Спектральные вегетационные индексы	65
Глава 3. Предварительная обработка спутниковых данных ДЗЗ для решения задач мониторинга растительного покрова	73
3.1. Фильтрация эффектов маскирующего влияния облаков	73
3.2. Метод радиометрической коррекции искажений отражательных характеристик земного покрова в данных спутниковых измерений, вызванных влиянием рельефа местности	80
3.3. Реконструкция временных рядов данных ДЗЗ	87
Глава 4. Оценка современного состояния и динамики растительного покрова России на основе методов спутникового картографирования и прогнозного моделирования	93
4.1. Метод локально-адаптивной классификации и оценки характеристик растительного покрова	93
4.2. Спутниковое картографирование и оценка динамики растительного покрова России	104

4.3. Картографирование породной структуры лесов на основе спутниковых данных	111
4.4. Оценка запасов стволовой древесины в лесах на основе спутниковых данных	119
4.5. Спутниковое картографирование сельскохозяйственных земель на основе временных рядов данных ДЗЗ	131
4.6. Прогнозное моделирование динамики растительного покрова России на основе данных спутникового картографирования	139
Глава 5. Построение информационных сервисов анализа данных спутникового мониторинга растительного покрова	155
5.1. Современные технологии построения информационных сервисов использования спутниковых данных ДЗЗ	156
5.2. Организация работы с долговременными архивами данных ДЗЗ.....	160
5.3. Возможности создания инструментов распределенной обработки данных ДЗЗ	164
5.4. Основные возможности сервиса BEGA-SCIENCE для анализа состояния и динамики растительного покрова	168
5.5. Использование спутникового сервиса BEGA-SCIENCE для построения и анализа карт растительного покрова	172
Заключение	180
Список сокращений	184
Литература	190

ПРЕДИСЛОВИЕ

Природные ресурсы – одно из главных богатств России, залог её процветания и особой роли в мире. При этом не стоит забывать, что к ним относятся не только полезные ископаемые, но и огромное разнообразие биоресурсов. Обширная территория и огромные биологические ресурсы не только выделяют Россию из ряда других стран, но и накладывают на неё дополнительную ответственность по поддержанию устойчивости биосферы как на национальном, так и на планетарном уровне. Особенно остро стоит проблема сохранения лесов, значение которых в биосферных взаимодействиях трудно переоценить.

Космические средства наблюдения Земли являются одним из наиболее эффективных методов получения информации о состоянии земного покрова, океана и атмосферы, что подтверждается многолетними успешными работами в данной области. Эти работы привели к значительному прогрессу в развитии методов и технологий дистанционного зондирования, усилению их роли в информационном обеспечении фундаментальных исследований и решении прикладных задач. В настоящее время в мире разворачиваются масштабные, поддерживаемые на государственном уровне программы глобального мониторинга биологических ресурсов, и прежде всего лесов, на основе принципиально новых технологий дистанционного зондирования Земли из космоса.

Леса России относятся к важнейшей составляющей биоресурсного потенциала, занимая более 49% площади земель страны и около 20% общей площади лесного покрова планеты. В нашей стране дистанционные исследования лесов на основе спутниковых данных начали проводиться с середины 1970-х годов. Будучи в то время директором Института леса и древесины СО АН СССР (г. Красноярск), я имел счастье принять непосредственное участие в организации и проведении «пионерских» исследований и разработок в области дистанционного мониторинга лесов, во многом заложивших фундамент для развития этого важнейшего для нашей страны направления. Однако по-настоящему широкое использование методов дистанционного зондирования растительного покрова и, в частности, лесов началось в нашей стране уже в нынешнем столетии, в значительной степени благодаря усилиям авторов представляемой читателю монографии.

Разработанные в этом столетии методы и технологии открыли новую эру спутникового зондирования растительного покрова и позволили создать принципиально новые автоматизированные системы для работы с огромными массивами данных дистанционных наблюдений. Здесь следует особо выделить созданную в начале 2000-х годов в рамках международного проекта GLC2000 по данным спутни-

кового инструмента SPOT-VEGETATION карту наземных экосистем Северной Евразии, нашедшую широкое применение в нашей стране и за рубежом. Эта карта и опыт ее создания послужили, по сути, отправной точкой для формирования в нашей стране новой научной школы автоматизированного спутникового картографирования наземных экосистем, успешно развивающейся в настоящее время.

Представленные в монографии результаты исследований и разработок свидетельствуют о появлении принципиально новой научной парадигмы динамического спутникового картографирования, предполагающей регулярное обновление карт растительного покрова. Использование разработанных авторами методов и автоматизированных технологий позволило создать по данным MODIS временной ряд ежегодных карт растительного покрова России и получить уникальную информацию о динамике лесов за период 2000–2015 годов. Анализ полученного временного ряда спутниковых карт позволил, в частности, выявить существенное сокращение покрытой лесом площади нашей страны с начала текущего столетия, а также установить, что в динамике породной структуры лесов наблюдается снижение доли хвойных и рост участия лиственных лесов. Изменение породной структуры лесов обусловлено тем, что основные сплошнолесосечные рубки проводились преимущественно в хвойных лесах, а естественное возобновление древостоев на вырубках и гарях происходило, как правило, со сменой преобладающих пород.

Немаловажным фактором, обеспечившим возможность современных достижений в области спутникового мониторинга растительного покрова, явилось активное развитие в начале 2000-х годов национальных и международных программ создания космических аппаратов дистанционного зондирования. Существенно, что в XXI веке быстро менялась и политика доступа к спутниковым данным. Вслед за предоставлением открытого доступа к данным низкого и среднего пространственного разрешения такая возможность появилась и в отношении детальных спутниковых изображений. Значительно возросло число спутниковых систем, предоставляющих данные на безвозмездной основе, что позволило сделать их использование в научных и прикладных проектах экономически оправданным. Это в свою очередь привело к бурному развитию систем мониторинга окружающей среды, ориентированных на использование данных дистанционного зондирования.

В настоящее время можно констатировать, что фактически появился новый общедоступный измерительный инструмент, отвечающий требованиям исследователей, изучающих состояние и динамику растительного покрова. Созданные уникальные методы и технологии обработки данных дистанционного зондирования открыли возможности оценки растительного покрова всей территории страны, соседних стран и регионов. Более того, имеющиеся технологические разработки при наличии государственной поддержки могут быть достаточно быстро доведены до уровня, позволяющего картографировать растительный покров в масштабах всей планеты. По моему убеждению, созданные автоматизированные технологии обработки спутниковых данных дистанционного зондирования обладают стратегически важным потенциалом, открывающим принципиально новые возможности непрерывного мониторинга лесов и других биологических ресурсов нашей страны, а в перспективе и всей планеты.

Академик РАН А.С. Исаев

ВВЕДЕНИЕ

В развитии методологии спутникового картографирования растительного покрова как научно-технического направления можно выделить, на наш взгляд (Баргалева, Лупян, 2013), три основных этапа (*табл. 1*):

1. *Начальный этап (середина 1970-х – конец 1990-х)*, характеризуемый ограниченным доступом к спутниковым данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), доминированием методов визуального анализа и интерактивной обработки изображений, а также эпизодическим применением разрабатываемых методов и технологий на локальном и региональном уровнях, преимущественно в целях демонстрации их потенциальных возможностей;

2. *Переходный этап (конец 1990-х – начало 2000-х)*, отличающийся существенным упрощением доступа к данным (как правило, историческим) вследствие изменения политики их распространения и использования Интернет-технологий, появлением возможностей получения и автоматизированной обработки временных рядов данных континентального и планетарного уровней пространственного охвата, осуществлением крупных международных проектов в области глобального картографирования и мониторинга наземных экосистем;

3. *Современный этап (начало 2000-х – настоящее время)*, характерные черты которого определяются нарастающим уровнем открытости доступа к спутниковым данным, предоставляющим возможности оперативного их получения и формирования однородных (по радиометрическому и геометрическому качеству) многолетних рядов, развитием автоматических технологий предварительной и тематической обработки данных, а также созданием web-сервисов on-line предоставления информационных продуктов и инструментов их анализа для оценки состояния и динамики растительного покрова.

Не останавливаясь детально на исторических аспектах формирования современного облика методологии спутникового картографирования растительного покрова, хотелось бы отметить, что вектор текущего развития данного научного направления в России в значительной степени был задан рядом методических и технологических разработок, выполненных при непосредственном участии авторов представляемой читателю коллективной монографии и обеспечивших возможность регулярного получения информации о состоянии и динамике растительности на национальном уровне территориального охвата.

Одной из основных, на наш взгляд, отправных вех становления современного этапа развития методологии спутникового картографирования растительного

Таблица 1. Основные этапы развития методологии спутникового картографирования растительного покрова

Начальный этап развития (с середины 1970-х годов)	Переходный этап развития (конец 1990-х – начало 2000-х годов)	Современный этап развития (с начала 2000-х годов)
<ul style="list-style-type: none"> Отсутствие свободного доступа к данным Значительное время на получение данных Локальный и региональный охват 	<p align="center">Спутниковые данные</p> <p>Свободный on-line доступ к глобальным архивам исторических данных:</p> <ul style="list-style-type: none"> SPOT-VEGETATION Terra/Aqua-MODIS Landsat-TM/ETM+ 	<p>Свободный on-line доступ к оперативно обновляемым глобальным архивам данных:</p> <ul style="list-style-type: none"> Terra/Aqua-MODIS, NPP-VIIRS, Proba-V Landsat-TM/ETM+/OLI Sentinel-2 и -3
<ul style="list-style-type: none"> Методы визуального анализа и интерактивной обработки изображений 	<p align="center">Методы обработки спутниковых данных</p> <ul style="list-style-type: none"> Методы автоматизированной обработки временных рядов данных 	<ul style="list-style-type: none"> Технологии автоматической обработки многолетних рядов данных на большие территории
<ul style="list-style-type: none"> Крупные вычислительные комплексы коллективного пользования 	<p align="center">Вычислительные средства</p> <ul style="list-style-type: none"> Обработка больших массивов данных на персональных компьютерах 	<ul style="list-style-type: none"> Кластерные и «облачные» технологии обработки сверхбольших массивов данных
<ul style="list-style-type: none"> Технологии региональной инвентаризации лесов, пастбищ, с. х. посевов и др. 	<p align="center">Технологии мониторинга</p> <ul style="list-style-type: none"> Автоматические технологии обработки данных и доступа к результатам на основе сети Интернет 	<ul style="list-style-type: none"> Автоматические web-сервисы on-line предоставления информационных продуктов и инструментов анализа данных
<ul style="list-style-type: none"> Преимущественное использование в демонстрационных целях 	<p align="center">Пользователи</p> <ul style="list-style-type: none"> Крупные государственные организации 	<ul style="list-style-type: none"> Международные организации (FAO и др.) Государственные организации Частные компании

покрова в нашей стране стало создание по данным SPOT-VEGETATION в рамках проекта Global Land Cover 2000 (GLC2000) карты наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2003), нашедшей широкое использование в различных научных проектах и системах мониторинга окружающей среды. Ценность опыта создания этой карты состояла не только в передовых для того времени научно-методических решениях, но и в выборе направлений дальнейшего развития методологии спутникового картографирования растительного покрова, положенном в основу формирования приоритетов исследований и разработок.

К отличительным чертам выполняемых коллективом авторов в данном направлении исследований и разработок можно отнести следующие, во многом взаимосвязанные, особенности:

- высокий уровень автоматизации обработки спутниковых данных, предполагающий минимальное участие человека;
- адаптивность разрабатываемых алгоритмов обработки данных для обеспечения возможности их использования без дополнительной настройки параметров в широком диапазоне условий спутниковых наблюдений;
- возможность эффективного использования разрабатываемых методов (в частности, как следствие вышеуказанных особенностей) на больших территориях, в том числе на уровнях национального, континентального и глобального охвата;
- интенсивное использование временных рядов данных многоспектральных спутниковых наблюдений и комплексирование данных различного пространственного разрешения (от десятков метров до километров).

Выполненные к настоящему времени исследования в области спутникового картографирования растительного покрова были, прежде всего, сфокусированы на следующих основных направлениях:

- разработка комплекса алгоритмов, методов и технологий предварительной обработки данных ДЗЗ (фильтрация влияния мешающих факторов и случайных шумов, коррекция искажений) для повышения достоверности результатов их последующего тематического анализа;
- разработка комплекса адаптивных алгоритмов, методов и технологий автоматического распознавания типов земной поверхности по данным ДЗЗ для картографирования и выявления изменений растительного покрова;
- создание на основе методов и технологий обработки данных ДЗЗ тематических продуктов, отражающих состояние и динамику растительного покрова;
- разработка методов ассимиляции результатов обработки данных ДЗЗ в математические модели прогноза динамики растительного покрова.

Результаты выполненных разработок широко применяются для решения прикладных и научных задач, в частности, для обеспечения функционирования действующих информационных систем спутникового мониторинга окружающей среды на национальном и региональном уровнях. К числу такого рода систем можно отнести Информационную систему дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) (Барталев и др., 2010; Лупян и др., 2015), спутниковый сервис мониторинга растительного пок-

рова ВЕГА (Лупян и др., 2011б; Барталев и др., 2012б; Лупян и др., 2014б) и некоторые другие.

Представляемая вниманию читателей монография служит цели обобщения полученных к настоящему времени основных результатов исследований и разработок коллектива авторов по развитию методов спутникового картографирования растительного покрова.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам Отдела технологий спутникового мониторинга Института космических исследований Российской академии наук, принимавшим участие в исследованиях и разработках коллектива авторов на различных этапах, а также обеспечившим технологическую и организационную поддержку широкому практическому применению разработанных методов спутникового картографирования растительного покрова.

Подготовка и издание настоящей коллективной монографии осуществлено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00389) в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космических исследований Российской академии наук.

Глава 1

МЕТОДОЛОГИЯ СПУТНИКОВОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

1.1. Спутниковое картографирование как метод изучения растительного покрова

Растительный покров является неотъемлемой составляющей биосферы Земли и фундаментальным фактором создания условий для жизни на нашей планете (Вернадский, 1989). По имеющимся оценкам, примерно 77% поверхности суши (без учета Антарктиды и Гренландии) или 130–135 млн. км² занято различными видами растительного покрова, представленного, в том числе лесами (31,7%), пастбищами (26,0%), пашней (10,3%) и другими, как правило, менее продуктивными типами земель (Максаковский, 2003). Будучи крайне неравномерной, структура растительного покрова является одним из факторов, определяющих направление экономического развития многих стран мира, включая такие отрасли, как лесная промышленность, сельскохозяйственное растениеводство, пастбищное животноводство, биоэнергетика. В частности, по покрытой лесом площади в тройку мировых лидеров входят Россия (7,64 млн. км²), Бразилия (5,66 млн. км²) и Канада (2,47 млн. км²), а по площади пастбищ – Австралия (4,14 млн. км²), Китай (4,00 млн. км²) и США (2,40 млн. км²). К странам, располагающим наибольшей площадью пахотных земель, относятся США (1,86 млн. км²), Индия (1,66 млн. км²) и Россия (1,18 млн. км²).

Являясь источником ценных биологических ресурсов, растительный покров Земли одновременно выполняет и ряд важнейших функций регулятора фундаментальных процессов обмена энергией и веществом на планете, играет огромную экологическую и социально-культурную роль для человечества. Антропогенное воздействие и глобальные изменения климата в настоящее время сопровождаются нарастанием процессов трансформации и деградации растительного покрова, обусловленных, в частности, природными пожарами, вырубкой лесов и их гибелью в результате техногенного воздействия, вспышками массового размножения насекомых–вредителей, изменениями режимов землепользования, опустыниванием. Наряду с ростом населения эти факторы приводят в ряде регионов к нехватке про-

довольствия и питьевой воды, а предпринимаемые попытки расширения пахотных угодий могут вызывать деградацию почв и снижение уровня их продуктивности.

Вместе с тем обеспеченность объективной и регулярно обновляемой информацией о состоянии растительного покрова в настоящее время является недостаточной и не отвечает современным политическим, экономическим и экологическим вызовам. Разрозненные данные отдельных стран и международных структур часто несопоставимы и не дают целостной картины актуального состояния растительного покрова и, следовательно, не могут быть положены в основу анализа и прогнозирования его динамики.

Указанные предпосылки послужили основанием для развития методов картографирования растительного покрова, основанных на использовании систем дистанционного зондирования Земли из космоса. Технические возможности современных спутниковых систем дистанционного зондирования позволяют осуществлять глобальные наблюдения растительного покрова в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения, величин пространственного и временного разрешения. В период с начала 1990-х годов до настоящего времени в мире инициирован ряд крупных международных и национальных программ, направленных на развитие возможностей глобального спутникового картографирования растительного покрова. К их числу можно отнести программы Европейской комиссии (ЕС), Европейского космического агентства (ESA), Продовольственной и сельскохозяйственной Организации объединенных наций (ФАО ООН), Национального космического агентства США (NASA), Министерства науки Китая. Результаты этих проектов находят использование для оценки лесных ресурсов, обеспечения продовольственной безопасности, оценки последствий и прогнозного моделирования климатических изменений.

Примеры наиболее известных проектов в области глобального спутникового картографирования растительного покрова приведены в *табл. 1.1*. Первый заслуживающий, на наш взгляд, упоминания в данном контексте опыт спутникового картографирования растительного покрова планеты был получен в рамках Международной геосферно-биосферной программы (проект IGBP-DISCover, Loveland et al., 1999) на основе данных радиометра NOAA-AVHRR, собранных сетью наземных приемных станций в 1992–1993 годах. Проект позволил создать глобальную карту земного покрова с пространственным разрешением 1 км и легендой из 17-ти тематических классов. В дальнейшем на основе более глубокой обработки этого же набора данных NOAA-AVHRR Университетом штата Мэриленд (США) была получена более точная версия карты земного покрова (Hansen et al., 2000).

Методология глобального спутникового картографирования растительного покрова получила существенное развитие в рамках международного проекта Global Land Cover 2000 (GLC2000), координируемого Объединенным исследовательским центром Европейской комиссии (Bartholome, Belward, 2005). В основу проекта было положено использование данных с пространственным разрешением 1 км, полученных прибором VEGETATION со спутника SPOT-4. По сравнению с IGBP-DISCover карта земного покрова GLC2000 отличается более высокой точностью и тематической детальностью легенды, включающей 22 класса.

Дальнейшее развитие глобального спутникового картографирования растительного покрова сопряжено с появлением спектрорадиометра MODIS, осуществ-

вляющего со спутников Terra и Aqua измерения характеристик отраженного и собственного излучения земной поверхности в 36 диапазонах длин волн с пространственным разрешением 250 м, 500 м и 1 км в зависимости от спектрального канала. Разработанная Бостонским Университетом (США) (Friedl et al., 2010) автоматическая технология обеспечивает ежегодное глобальное картографирование земного покрова по данным MODIS с пространственным разрешением 500 м в классах легенды IGBP-DISCover.

К числу получивших известность разработок в области глобального спутникового картографирования растительного покрова можно отнести и проект GlobCover (Arino et al., 2008), целью которого являлась разработка автоматической технологии построения карт на основе данных спутниковой системы Envisat-MERIS. Полученные в рамках проекта глобальные карты растительного покрова основаны на данных наблюдений 2005 и 2009 годов, имеют пространственное разрешение 300 м и близкую к карте GLC2000 легенду.

Пространственно наиболее детальная (разрешение 30 м) на настоящий момент глобальная спутниковая карта земного покрова создана Национальным центром геоматики Китайской Народной Республики по данным системы Landsat в рамках проекта GLC30 (Chen et al., 2015). Легенда карты GLC30 имеет относительно низкий уровень тематической детальности, включая лишь десять классов земного покрова. Следует отметить, что в силу используемого метода, включающего интерактивную обработку и визуальную интерпретацию спутниковых изображений большим числом экспертов, результаты картографирования отличаются высоким уровнем субъективности.

Современные инструментальные возможности глобального спутникового картографирования лесов характеризуются и наличием методов оценки его характеристик в непрерывных шкалах в качестве подхода, альтернативного заданию ограниченного числа тематических классов на основе предварительно выбранных пороговых критериев. К числу получивших широкую известность продуктов этого класса относится разработанная Университетом шт. Мэриленд (США) глобальная карта проективного покрытия лесов, созданная и ежегодно обновляемая по данным системы Landsat (Hansen et al., 2013). Указанная карта отражают величину (%) проективного покрытия лесов, а также вызываемые деструктивными факторами и процессами лесовозобновления изменения в лесах за период с 2000 года.

Несмотря на предпринимаемые с середины 1990-х годов усилия, методические и технологические аспекты спутникового картографирования растительного покрова на больших территориях, на наш взгляд, все еще требуют существенного развития. Это объясняется концептуальной сложностью проблемы картографирования растительности при необходимости максимально полной автоматизации процессов обработки спутниковых данных с использованием алгоритмов, обеспечивающих высокую точность распознавания объектов земного покрова в условиях пространственно-временной изменчивости их спектрально-отражательных характеристик.

Упомянутые обстоятельства, очевидно, могут служить объяснением того, что выполненные к настоящему времени крупные проекты по глобальному картографированию земного покрова (в англоязычных публикациях — land cover) рассматривают относительно небольшое число тематических классов, а валидация соз-

Таблица 1.1. Международные проекты глобального спутникового картографирования растительного покрова

Проект	Система ДЗЗ	Пространственное разрешение	Обновляемость	Разработчики	Год публикации
IGBP-DISCover	NOAA-AVHRR	1 км	Нет	МГБП ¹	1999
UML	NOAA-AVHRR	1 км	Нет	Университет шт. Мэриленд (США)	2000
GLC2000	SPOT-VGT	1 км	Нет	Объединенный исследовательский центр ЕК	2005
GlobCover	Envisat-MERIS	300 м	Да	Европейское космическое агентство	2008
MODIS LC	MODIS	500 м	Да	Университет Бостона (США)	2010
Global Forest Change	Landsat	30 м	Да	Университет шт. Мэриленд (США)	2013
GLC30	Landsat	30 м	Нет	Национальный центр геоматики (Китай)	2015

¹ МГБП – Международная геосферно-биосферная программа

данных карт свидетельствует об их относительно низкой точности. Так, широко используемая при картографировании земного покрова легенда IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) содержит 17 классов, пять из которых характеризуют лесной покров (Belward, 1996). Использование указанной легенды, в частности, было положено в основу глобальных карт земного покрова, созданных на основе данных радиометра NOAA-AVHRR с пространственным разрешением 1 км в рамках проектов IGBP-DIS (Loveland et al., 1999) и Университета штата Мэриленд (Hansen et al., 2000). Экспертная валидация карты IGBP-DIS с использованием изображений Landsat-TM показала, что для различных классов точность распознавания варьирует в диапазоне 40–100%, составляя в среднем 59,4% (Scepan, 1999).

Несколько более высокая точность распознавания типов земного покрова достигнута при создании карты GLC2000 по спутниковым данным SPOT-VEGETATION с пространственным разрешением около 1 км (Bartholome, Belward, 2005). При этом легенда карты включала 22 класса, а средняя точность распознавания типов земного покрова составила 68,6% (Mayaux et al., 2006).

Другие, созданные на основе данных спутниковых систем MODIS (Friedl et al., 2010) и Envisat-MERIS (Arino et al., 2008), глобальные карты земного покрова характеризуются тематической точностью, не превышающей в среднем 70–75%.

Получаемые на основе спутниковых данных региональные карты земного покрова, как правило, имеют несколько более высокую тематическую детальность, учитывающую особенности территории. К их числу можно отнести карты земного покрова Северной Евразии, созданные в рамках проектов GLC2000 (Bartalev et al., 2003) и NELDA (Sulla-Menashe et al., 2011).

Как упоминалось выше, решение задач картографирования больших территорий требует учета фактора пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик земного покрова, влияние которого, как правило, возрастает с увеличением географического охвата. В упомянутых примерах глобального и регионального картографирования учет данного фактора обеспечивался на основе различных подходов. Одним из широко используемых методических приемов, призванных снизить влияние фактора пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик одноименных типов земного покрова, является стратификация территории с классификацией спутниковых данных в границах отдельных стран. В предельно простом случае, как в проекте IGBP-DIS, в качестве стран выступают отдельные континенты (Belward, 1996), а по мере усложнения подходов выделяются регионы, однородные по совокупности критериев, учитывающих меняющиеся физико-географические, геоботанические и некоторые другие природные условия (Arino et al., 2008). Другой, используемый в ряде проектов по картографированию больших территорий, методический прием по снижению влияния географической изменчивости спектрально-отражательных характеристик одноименных типов земного покрова состоит в гиперкластеризации (Cihlar, 2000). Суть гиперкластеризации заключается в разбиении пространства признаков распознавания для выделения однородных групп пикселей (кластеров), число которых в десятки раз превышает количество тематических классов создаваемой карты.

Несмотря на то, что использование вышеуказанных методических приемов в ряде случаев является полезным и практически оправданным, они не способны, на наш взгляд, обеспечить универсальное и полное решение проблемы географиче-

ческой изменчивости спектрально-отражательных характеристик земного покрова. Более того, по нашему мнению, именно отсутствие в используемых методах распознавания механизмов адекватного учета указанного фактора является фундаментальным ограничением дальнейшего качественного роста уровня достоверности при спутниковом картографировании земного покрова больших территорий.

Рассматривая методические вопросы спутникового картографирования растительного покрова, нельзя не отметить важность наличия формализованных критериев определения классов легенды, основанных на общих для создаваемых карт принципах и не допускающих неоднозначностей содержательной интерпретации. Это позволяет обеспечить принципиальную возможность сопоставления полученных в разное время разнородных карт и оценки на их основе динамики растительного покрова. Принципиально новым шагом к унификации подходов к тематическому описанию классов явилась разработанная ФАО ООН система классификации земного покрова LCCS (Land Cover Classification System) (Di Gregorio, 2005), ставшая стандартом и эффективным инструментом формирования легенд спутниковых карт растительности. Согласно LCCS при разработке легенды карты необходимо учитывать такие признаки растительности, как ее жизненные формы (древесная, кустарниковая, травяная, мохово-лишайниковая), типы вегетативных органов (хвойные, лиственные) и типы фенологической динамики (вечнозеленые, листопадные).

Полученный опыт глобального спутникового картографирования в значительной мере применим и при создании карт растительного покрова России. Это обуславливается огромной территорией России, порождающей близость методических подходов к решению задач картографирования растительного покрова на глобальном и национальном уровнях.

1.2. Спутниковые системы ДЗЗ для картографирования растительного покрова

Беспрецедентно (в исторической ретроспективе) высокий уровень доступности спутниковых данных, как одна из черт современного этапа развития методологии спутникового картографирования растительного покрова, порождает мощную мотивацию для разработки новых методов их обработки и создания информационных систем мониторинга окружающей среды для широкого круга пользователей, не ограниченного рамками ведомственной или территориальной принадлежности. Стремительное развитие методов спутникового картографирования растительного покрова в значительной мере обусловлено, на наш взгляд, наличием открытых для общего доступа и колоссальных по объему архивов данных ДЗЗ различного пространственного разрешения, основные из которых рассмотрены ниже.

Измерения прибора AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) спутников серии NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), возможно, являются данными, впервые широко использовавшимися в задачах глобального изучения растительного покрова (Lu, 2006). Основное предназначение спутников NOAA — метеорологические исследования, однако, начиная с 1978 года и спутни-

ка TIROS-N (Television and InfraRed Observation Satellite – N) на них стал устанавливаться прибор AVHRR, имеющий информативные для изучения растительного покрова спектральные каналы. Возможности и характеристики прибора со временем совершенствовались, и последняя модификация прибора AVHRR/3, впервые запущенная в 1998 году на спутнике NOAA-15, имеет шесть спектральных каналов в диапазоне $\lambda = 0,58-12,50$ мкм, в том числе каналы в красной, ближней и средней ИК областях спектра, используемые для изучения растительности. Прибор имеет полосу охвата 2600 км и пространственное разрешение порядка 1,1 км. Одновременное наличие на орбите с конца 70-х годов как минимум двух спутников серии NOAA обеспечивает глобальное покрытие планеты данными измерений с периодичностью не реже двух раз в сутки. Данные прибора были использованы для создания первых глобальных карт типов земного покрова в рамках проектов IGBP-DIS (Loveland et al., 1999) и Университета штата Мэриленд (Hansen et al., 2000).

Разработка спутников серии SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) для изучения природных ресурсов, обнаружения, наблюдения и прогнозирования природных явлений и мониторинга человеческой деятельности началась в 1978 г., а запуск первого спутника серии состоялся в 1986 г. Первые три спутника семейства SPOT имели на борту два прибора HRV (High Resolution Visible), обеспечивавших получение данных в панхроматическом канале с разрешением 10 м и в трех спектральных каналах с центрами на $\lambda = 0,55$ мкм, $\lambda = 0,65$ мкм и $\lambda = 0,84$ мкм, подходящих для изучения растительного покрова, с разрешением 20 м. Сцена SPOT имеет размеры 60×60 км, что обеспечивает полосу охвата шириной 120 км при работе двух приборов одновременно. Возможность изменения геометрии наблюдений, позволяющая проводить съемку земной поверхности внутри полосы шириной 950 км, обеспечивает проведение от 4 до 11 разновременных измерений в заданной точке в течение 26-дневного орбитального периода спутника. На SPOT-4 был установлен модифицированный прибор HRVIR (High Resolution Visible and Infra-Red), имеющий дополнительный спектральный канал в среднем ИК диапазоне длин волн. Спутник SPOT-5 имеет на борту прибор HRG (High Resolution Geometric) с улучшенным пространственным разрешением в панхроматическом (2,5–5 м), а так же видимом и ближнем ИК (10 м) каналах. Важнейшей особенностью спутников SPOT второго поколения стало также наличие прибора VEGETATION, обеспечивающего глобальные ежедневные измерения спектрально-отражательных характеристик земной поверхности с разрешением 1 км, имеющего те же спектральные каналы, что и прибор HRVIR. Ежедневные измерения прибора VEGETATION были использованы для создания глобальной карты типов земного покрова GLC2000 (Bartholome, Belward, 2005). В частности, созданная в рамках проекта карта наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2003) является одним из наиболее широко используемых в задачах изучения растительного покрова России картографических продуктов, полученных по данным ДЗЗ.

Первый спутник семейства Landsat (Land Remote-Sensing Satellite), Earth Resources Technology Satellite 1, разработанный для наблюдения земной поверхности в интересах сельского и лесного хозяйства, геологии, картографии, мониторинга состояния окружающей среды, был запущен в 1972 году. Прибор MSS (Multi-Spectral Scanner), установленный на четырех первых спутниках серии, имел 4 спектральных канала: $\lambda = 0,5-0,6$ мкм, $\lambda = 0,6-0,7$ мкм, $\lambda = 0,7-0,8$ мкм и $\lambda = 0,8-1,1$ мкм.

Его пространственное разрешение составляло около 80 м при полосе охвата 185 км, а периодичность измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности – 18 дней. Данные MSS использовались в таких задачах мониторинга растительного покрова, как оценка масштабов вырубок и темпов восстановления лесов (Rencz, 1985; Bansal et al., 1991). Спутники Landsat 4 и Landsat 5 имели на борту усовершенствованный прибор ТМ (Thematic Mapper), позволявший получать данные в семи спектральных каналах в диапазоне $\lambda = 0,45–12,50$ мкм, имеющих в основном пространственное разрешение 30 м. Landsat 5 функционировал на орбите в течение почти 30 лет, что является рекордом среди спутниковых систем ДЗЗ. Следующим успешно запущенным спутником серии стал Landsat 7 с установленным прибором ЕТМ+ (Enhanced Thematic Mapper+), основными особенностями которого являются наличие панхроматического канала с разрешением 15 м и повышение разрешения теплового ИК канала до 60 м. Последний на данный момент 8-ой спутник семейства Landsat несет на борту инструменты OLI (Operational Land Imager) и TIRS (Thermal InfraRed Sensor). Прибор OLI имеет два дополнительных спектральных канала – $\lambda = 0,43–0,45$ мкм и $\lambda = 1,36–1,39$ мкм, позволяющие лучше учитывать влияние атмосферы, в то же время у прибора нет канала в дальнем ИК диапазоне. Анализ характеристик излучения поверхности Земли в этой области спектра осуществляется прибором TIRS, имеющим два тепловых ИК канала с разрешением 100 м. OLI также имеет отличную от прибора ЕТМ+ конструкцию, позволяющую получать данные более высокого качества. Данные Landsat широко используются для картографирования растительного покрова, в том числе для выделения различных типов лесов (Барталев и др., 1995; Гаврилюк, Ершов, 2013), а также для оценки структурных характеристик лесного покрова (Hall et al., 2006; Lu, 2005). На основе данных Landsat создана глобальная карта проективного покрытия лесов и получены оценки динамики площади лесного покрова (Hansen et al., 2013).

Прибор MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer), разработанный, в том числе, для мониторинга состояния и динамики растительного покрова, был установлен на спутнике Envisat (Environmental Earth-Observing Satellite), запущенном Европейским космическим агентством в 2002 году. Конструкция прибора позволяла во время полета проводить настройку ширины (1,25–25 нм) и расположения 15-ти спектральных каналов в диапазоне $\lambda = 0,39–1,04$ мкм. В номинальной конфигурации каналов прибора пять из них соответствовали характерным областям взаимодействия излучения с хлорофиллом и другими пигментами, и не менее трех других каналов также находилось в информативных для изучения растительности спектральных областях. Полоса охвата прибора составляла 1150 км, позволяя проводить измерения спектрально-отражательных характеристик земного покрова каждые три дня с пространственным разрешением 300 м. В рамках проекта GlobCover на основе данных прибора была создана глобальная карта типов земного покрова (Arino et al., 2008). В рамках проекта BIOMASAR измерения инструмента ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), также установленного на спутнике Envisat, использовались для построения карты запасов стволовой древесины в лесах Северного полушария (Santoro et al., 2015).

Спутник Terra, запущенный в 1999 году, осуществляет наблюдение поверхности Земли с помощью инструментов ASTER (Advanced Spaceborne Thermal

Emission and reflection Radiometer), MISR (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer) и MODIS. ASTER позволяет получать данные в трех спектральных каналах диапазона $\lambda = 0,52-0,86$ мкм с пространственным разрешением 15 м, в шести каналах в среднем ИК диапазоне $\lambda = 1,60-2,43$ мкм с разрешением 30 м и в пяти каналах дальнего ИК диапазона $\lambda = 8,125-11,650$ мкм с разрешением 90 м. Полоса охвата прибора составляет 60 км, а возможность наведения прибора в направлении, перпендикулярном движению спутника, позволяет достичь периодичности наблюдений в 16 дней для всех 14 каналов и 5 дней для каналов диапазона $\lambda = 0,52-0,86$ мкм. Прибор MISR осуществляет измерения спектрально-отражательных характеристик земной поверхности в четырех спектральных каналах диапазона $\lambda = 0,45-0,87$ мкм для 9 разных зенитных углов положения прибора. Пространственное разрешение MISR составляет до 275 м при полосе охвата 360 км, а периодичность измерений составляет от 2 до 9 дней в зависимости от широты.

Особо следует отметить прибор MODIS, разработанный для изучения биологических и физических процессов в глобальном масштабе с периодичностью наблюдений в 1–2 дня, в частности, для исследований растительного покрова. MODIS имеет 36 спектральных каналов в диапазоне $\lambda = 0,46-14,39$ мкм, в том числе информативные для изучения растительности красный ($\lambda = 0,62-0,67$ мкм) и ближний ИК ($\lambda = 0,84-0,88$ мкм) каналы с пространственным разрешением 250 м, и ряд каналов с разрешением 500 м, используемых для анализа характеристик растительности и фильтрации облачности. Полоса охвата прибора составляет 2330 км, а покрытие данными измерений всей территории России обеспечивается с периодичностью не реже одного раза в сутки. Таким образом, данные прибора образуют непрерывный однородный архив ежедневных наблюдений в течение более 15 лет, анализ которых может быть эффективно использован для изучения и мониторинга растительного покрова. Данные MODIS успешно используются для распознавания различных групп пород леса (Барталев и др., 2011а; Жарко, Барталев, 2014), определения биофизических и структурных параметров лесного покрова (Vaccini et al., 2008; Blackard et al., 2008), оценки возрастной структуры лесных насаждений (Lucas et al., 2002). Результаты измерений прибора также используются для создания глобальной карты типов земного покрова (Friedl et al., 2010).

Следует также отметить спутники Proba-V (Project for On-Board Autonomy – VEGETATION) и Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership), запущенные в 2013 и 2011 годах соответственно. Proba-V имеет на борту прибор VEGETATION, являющийся приемником соответствующей программы спутников SPOT и обеспечивающий глобальное получение данных в тех же спектральных каналах с разрешением около 300 м и периодичностью 1–2 дня. В то же время, при наблюдении территории в центральной полосе под спутником пространственное разрешение составляет около 100 м, обеспечивая глобальное покрытие данными указанного уровня детальности с временным разрешением не хуже 1 раза в 5 дней. Прибор VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), установленный на спутнике Suomi NPP, в свою очередь, служит развитием таких программ, как NOAA AVHRR и MODIS. VIIRS имеет 22 спектральных канала в диапазоне $\lambda = 0,41-12,01$ мкм с пространственным разрешением 0,4–1,6 км в зависимости от канала и геометрии наблюдений, полосу охвата 3000 км и обеспечивает ежедневное глобальное покрытие данными.

Спутниковая система ДЗЗ Sentinel-2, созданная Европейским космическим агентством в рамках программы Copernicus для решения задач мониторинга лесов и других типов земного покрова, управления чрезвычайными ситуациями, включает в себя два одинаковых спутника Sentinel-2A и Sentinel-2B. Установленный на спутниках Sentinel-2 прибор ДЗЗ обеспечивает возможность проведения измерений отраженного земной поверхностью излучения в 13 спектральных каналах видимого, ближнего ИК и среднего ИК диапазонов с пространственным разрешением 10 м, 20 м и 60 м. Периодичность наблюдений земной поверхности – не реже одного раза в пять дней.

Среди отечественных спутниковых систем ДЗЗ можно отметить прибор КМСС (Комплекс многозональной спутниковой съемки), установленный на спутниках Метеор-3М, а так же систему Ресурс-ДК. Инструмент КМСС позволяет получать данные в шести спектральных каналах диапазона $\lambda = 0,37-0,90$ мкм с разрешением 60/120 метров (в зависимости от режима работы) с периодичностью 2–3 дня. Система Ресурс-ДК производит измерения отражательных характеристик поверхности в панхроматическом канале с разрешением 2,8 м, а так же в зеленом, красном и ближнем ИК каналах с разрешением 3–5 м.

Как будет отмечено ниже (глава 4), спутниковое картографирование растительного покрова на основе измерений характеристик отраженного излучения включает в себя анализ их временной динамики. В частности, характерный временной промежуток между наступлением различных фенологических фаз для деревьев разных пород составляет порядка недели (Елагин, 1994), что обуславливает соответствующие требования к периодичности измерений характеристик отраженного излучения, свободных от влияния облачности. При этом даже ежедневные наблюдения не гарантируют достаточного количества чистых измерений (рис. 1.1; Плотников, 2012), что делает использование спутниковых систем более низкого временного разрешения существенно менее эффективным.

При этом получение данных как в информативных для изучения растительности красном и ближнем ИК спектральных каналах, так и в каналах, необходимых для фильтрации мешающих факторов (голубой и средний ИК), должно обеспечиваться с наилучшим пространственным разрешением. Таким образом, исходя из совокупности описанных требований, наиболее эффективным при изучении растительного покрова по данным ДЗЗ в оптическом диапазоне спектра на настоящий момент является использование прибора MODIS. В ИКИ РАН создан непрерывно пополняемый архив данных ежедневных измерений характеристик отраженного излучения земной поверхности прибором MODIS для всей территории России начиная с 2000 года (Бурцев и др., 2006), что позволяет проводить анализ длинных однородных временных рядов наблюдений.

В основе современных тенденций в области распространения спутниковых данных лежит осуществляемая рядом ведомств (Геологическая служба США, Европейское космическое агентство и некоторые другие) политика открытого доступа к данным, получаемым в широком диапазоне величин пространственного разрешения. В настоящее время при решении задач мониторинга растительного покрова с различной степенью интенсивности используются данные спутниковых систем низкого и среднего пространственного разрешения (100 м – 1 км), таких как NOAA-AVHRR, SPOT-VEGETATION, Terra/Aqua-MODIS, Envisat-MERIS, NPP-VIIRS,

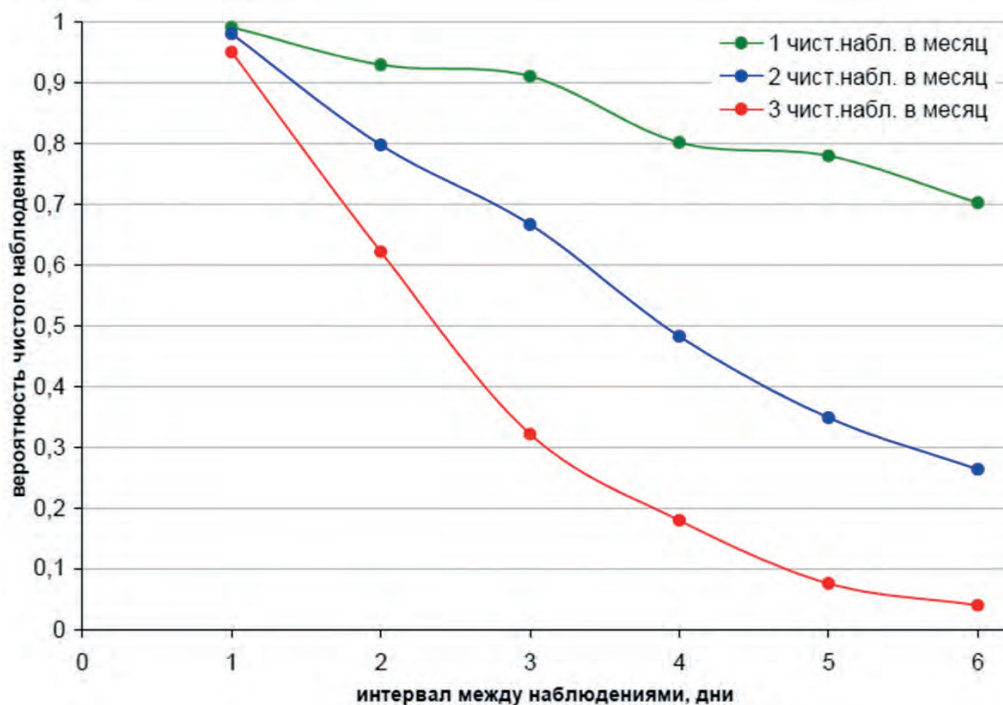


Рис. 1.1. Вероятность получения чистых спутниковых измерений характеристик земной поверхности в зависимости от частоты наблюдений (Плотников, 2012)

Proba-V. Предоставленный открытый доступ к данным Landsat-TM/ETM+/OLI и Sentinel-2, имеющим пространственное разрешение 10–30 м, существенно расширил потенциальные возможности спутникового картографирования растительного покрова.

Эффективность использования данных ДЗЗ для картографирования и мониторинга растительного покрова в значительной степени определяется уровнем оперативности их поступления в информационные архивы и технологиями предоставления к ним доступа. Необходимо при этом также учитывать различия в стандартах обработки спутниковых данных, определяющих уровень их радиометрического и геометрического качества и, следовательно, возможность формирования на их основе однородных временных рядов измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности и построения алгоритмов тематической обработки. Анализ особенностей имеющихся в настоящее время в открытом доступе спутниковых данных и технологических схем их распространения показывает, что данные систем Terra/Aqua-MODIS, Proba-V, Landsat-OLI и Sentinel-2 сейчас в наибольшей степени удовлетворяют следующим, необходимым для построения эффективных систем спутникового картографирования растительного покрова, требованиям:

1. наличие технических условий для построения автоматических веб-технологий поиска данных в удаленных архивах и их потоковой передачи в базы данных специализированных информационных систем мониторинга;

2. регулярное обновление архивов спутниковых данных в режиме, близком к реальному времени;

3. высокое радиометрическое и геометрическое качество данных, проходящих стандартизованную предварительную обработку;

4. наличие многолетних однородных (по радиометрическим и геометрическим характеристикам) рядов данных глобальных спутниковых наблюдений.

С учетом указанных требований в ИКИ РАН были сформированы многолетние, охватывающие территорию России и стран ближайшего окружения, архивы данных ДЗЗ, а также разработаны технологии их непрерывного обновления и обработки (Лузян и др., 2012а,в).

1.3. Основные направления развития методологии спутникового картографирования растительного покрова России

В начале 2000-х годов в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) сформировались условия для целенаправленных исследований и разработок в области спутникового картографирования растительного покрова на национальном уровне. В частности, была создана развитая техническая инфраструктура и разработаны программные комплексы хранения и автоматизированной обработки сверхбольших объемов спутниковых данных. Начались работы по формированию непрерывно обновляемых многолетних архивов спутниковых данных, охватывающих всю территорию России и близлежащих государств. В том числе была создана автоматическая технология непрерывного обновления архива ежедневных данных MODIS, положенных в основу разработки целого ряда тематических карт, характеризующих растительный покров России. Были сформированы архивы и других спутниковых данных, удовлетворяющих по характеристикам условиям решения задач спутникового картографирования растительного покрова. К этому же времени получили развитие автоматизированные технологии управления потоковой обработкой больших массивов спутниковых данных.

На период 2000-х годов пришлось и формирование в ИКИ РАН научной школы и коллектива ученых в области автоматизированных методов спутникового картографирования растительного покрова. К числу отличительных черт развиваемой коллективом авторов методологии спутникового картографирования растительного покрова можно отнести следующие основные положения:

- направленность на разработку методов и технологий автоматической обработки данных ДЗЗ, обеспечивающих полную воспроизводимость результатов картографирования;
- ориентированность на разработку адаптивных алгоритмов тематической обработки данных ДЗЗ, обеспечивающих локализованную оптимальную (само)настройку параметров в зависимости от пространственного расположения картографируемого объекта и времени проведения спутниковых наблюдений;

- применимость разрабатываемых методов и технологий для картографирования растительного покрова на больших территориях вплоть до глобального охвата (крупные страны, континенты и планета в целом);
- возможность формирования однородных временных рядов спутниковых карт, способных характеризовать динамику растительного покрова (*концепция динамического картографирования*).

При этом, выступая в качестве целеполагающих условий развиваемой методологии спутникового картографирования растительного покрова, два последних положения в значительной степени могут рассматриваться и как следствие первых двух. Рассматривая развитие научной методологии в историческом аспекте, необходимо отметить, что выработка вышеперечисленных положений в значительной мере опиралась на опыт исследований и разработок, накопленный при создании карты наземных экосистем Северной Евразии (Bartalev et al., 2003) в рамках проекта GLC2000.

Созданная на основе данных спутниковой системы SPOT-VEGETATION карта наземных экосистем Северной Евразии имеет пространственное разрешение около 1 км, а ее легенда включает в себя 27 тематических классов, образующих семь различных групп, таких как леса, кустарники, травянистая растительность, водно-болотные комплексы, тундра, растительные комплексы и не покрытые растительностью земли. Достигнутый при создании карты наземных экосистем Северной Евразии уровень тематической детальности и достоверности создал предпосылки для широкого ее использования в научных проектах и практических приложениях, насчитывающих сотни пользователей в различных странах. Созданная карта впервые наглядно продемонстрировала масштабную смену коренных хвойных лесов вторичными лиственными лесами в Европейской части России, центральной Сибири и на Дальнем Востоке в результате интенсивных вырубок второй половины прошлого столетия и пожаров. Анализ карты также позволил оценить масштабы зарастания лесом заброшенных в период постперестроечного спада экономики сельскохозяйственных земель в ряде регионов России.

Вместе с тем метод создания карты наземных экосистем Северной Евразии предполагал значительное экспертное участие в процессе классификации спутниковых данных. Как следствие, процесс тематического картографирования был сопряжен с большими временными затратами, содержал элементы субъективности интерпретации спутниковых данных и не обеспечивал полную воспроизводимость результатов.

Полученный при создании карты опыт позволил сделать ряд важных выводов. В частности, было продемонстрировано, что решение задач картографирования больших территорий требует учета фактора пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик земного покрова, влияние которого, как правило, возрастает с увеличением географического охвата. К числу важных, следующих из опыта создания карты наземных экосистем Северной Евразии, выводов также следует отнести и необходимость максимально полного использования возможностей извлечения тематической информации о растительности из временных рядов спутниковых данных, способных характеризовать как сезонную, так и многолетнюю динамику спектрально-отражательных характеристик земного покрова.

Сделанные в ходе создания карты наземных экосистем Северной Евразии выводы позволили придать дальнейшим разработкам в области спутникового картографирования растительного покрова принципиально новые черты, в значительной мере определившие не только полученные к настоящему моменту результаты, но и задающие тренд дальнейшего развития методологии и совершенствования картографических продуктов.

Анализ возможностей получения на основе спутниковых данных информации о растительном покрове показывает, что в значительной степени они определяются рядом физических, технических и методических предпосылок, таких как:

- зависимость отражательной способности от типа земной поверхности, ее структурных и физико-химических характеристик с одной стороны, и, с другой стороны, длин волн электромагнитного излучения, времени и угловых условий наблюдения;
- возможности спутникового сенсора по регистрации отраженного излучения как функции упомянутых выше параметров наблюдения;
- наличие моделей описания структурных и физико-химических свойств земной поверхности в пространстве регистрируемых сигналов, и основанных на них методов анализа данных спутниковых наблюдений.

Первые две группы из упомянутых выше особенностей предопределены свойствами объекта наблюдения и характеристиками спутниковых сенсоров, в то время как выбор методов анализа данных должен исходить из адекватных описаний связей характеристик наземных экосистем с получаемыми приборами дистанционного зондирования сигналами.

Упомянутый выше архив данных MODIS, сформированный в ИКИ РАН, содержит многолетний ежедневно пополняемый временной ряд стандартных продуктов данных MOD09, охватывающих всю территорию Северной Евразии (Бурцев и др., 2006). Наличие отвечающего требованиям спутникового картографирования растительного покрова на национальном уровне архива данных MODIS в значительной мере предопределило их широкомасштабное использование в исследованиях и разработках коллектива авторов вплоть до настоящего времени. Более того, по мере увеличения продолжительности временного ряда данных MODIS открываются возможности разработки методов извлечения из него недоступной ранее информации о растительном покрове. В этом смысле появление новых систем ДЗЗ, в том числе и более высокого пространственного разрешения, не сможет в ближайшей перспективе создать альтернативу данным MODIS в решении задач, требующих длинных временных рядов данных, характеризующихся высокой частотой регулярных наблюдений.

Конкретизируя различные аспекты исследований и разработок по развитию методологии спутникового мониторинга, можно выделить следующие основные направления:

- методы предварительной обработки спутниковых данных;
- методы классификации типов растительного покрова;
- методы оценки характеристик растительного покрова.

При решении задач картографирования растительного покрова предварительная обработка временных рядов данных MODIS направлена на снижение влияния мешающих факторов, таких как облака и образуемые ими тени, сезонный снежный покров и аппаратные шумы. Выполненный на начальных стадиях использования данных MODIS анализ показал, что распространяемые Геологической службой США стандартные продукты данных (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>) по уровню качества не полностью удовлетворяют требованиям разработки на их основе эффективных автоматических методов картографирования растительного покрова. Это, в свою очередь, потребовало развития методов фильтрации данных, подверженных влиянию облачного покрова, и снижения влияния эффектов анизотропии отраженного излучения при меняющихся угловых условиях солнечного освещения и наблюдения поверхности. Решение этой задачи определило проведение исследований и разработок по созданию автоматических технологий обработки данных MODIS, обеспечивающих получение производных продуктов с уровнем качества, удовлетворяющим требованиям разработки автоматических методов спутникового картографирования (глава 3). Методы предварительной обработки данных MODIS позволяют формировать улучшенные продукты данных для их тематического анализа (Барталев и др., 2011а).

Для дополнительной компенсации влияния условий съёмки и заполнения пропусков в данных спутниковых наблюдений земной поверхности разработан алгоритм полиномиальной аппроксимации временных рядов данных с использованием динамического скользящего окна, включающего фиксированное количество измерений для вычисления коэффициентов полинома (Плотников и др., 2014). Алгоритм позволяет решать задачи заполнения пропущенных значений коэффициента спектральной яркости или вегетационного индекса, а также исключения измерений, сделанных под остаточным влиянием мешающих факторов и сглаживания временных рядов данных одновременно.

Принципиально новый шаг в развитии методологии спутникового картографирования растительного покрова сопряжен с разработкой алгоритма локально-адаптивной классификации LAGMA (Locally Adaptive Global Mapping Algorithm) (Bartalev et al., 2014). В основе алгоритма лежит принцип пространственной локализации процессов обучения классификатора и распознавания типов земного покрова. Использование алгоритма позволяет обеспечить адаптивность классификатора к пространственным изменениям физико-географических условий как одного из требований, предъявляемых к методам обработки спутниковых данных на глобальном уровне. В отличие от ранее известных методов алгоритму LAGMA генетически присущ механизм учета пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик (или любых других признаков распознавания) земного покрова. Это обеспечивает возможность унифицированного картографирования растительного покрова больших территорий без необходимости предварительной стратификации. Указанная особенность метода LAGMA открывает потенциальную возможность его использования для создания карт растительного покрова любого, вплоть до глобального, географического охвата.

Будучи изначально разработанным для решения задач классификации данных спутниковых наблюдений, алгоритм LAGMA получил дальнейшее развитие за счет включения в него опций, обеспечивающих, в частности, возможность

регрессионной оценки характеристик земного покрова в количественных шкалах.

Упомянутые выше методические разработки, реализованные в виде высокопроизводительных программных комплексов и автоматических технологий предварительной обработки и классификации спутниковых данных, позволили создать целый ряд тематических карт национального уровня, отражающих структуру и характеристики растительного покрова России (см. главу 4), включая такие, как:

- карта типов растительного покрова;
- карта используемых пахотных земель;
- карта преобладающих пород леса;
- карта запасов стволовой древесины в лесах.

При этом, реализуя упомянутую ранее концепцию динамического картографирования растительного покрова, составляющую одну из отличительных особенностей проводимых исследований и разработок в данной области, были сформированы временные ряды перечисленных выше спутниковых карт. Пространственное разрешение всех полученных на основе данных MODIS карт растительного покрова составляет 230 м.

Временной ряд созданных к настоящему времени карт типов растительного покрова России (Барталев и др., 2011a) охватывает период 2000–2015 годов и ежегодно дополняется по мере сбора и обработки спутниковых данных. Легенда карты включает в себя 23 тематических класса, 18 из которых характеризуют различные типы растительности, выделенные с учетом их жизненных форм, типов вегетативных органов и фенологической динамики. В настоящее время эта карта является наиболее детальным в пространственном и тематическом отношении источником информации о типах растительного покрова России, полученной на всю территорию страны на основе данных ДЗЗ. При этом необходимо учитывать, что процесс построения карты автоматизирован, что обеспечивает полную повторяемость получаемых результатов и позволяет проводить ежегодное картографирование растительного покрова в масштабах страны. Полученный временной ряд карт открывает принципиально новые возможности оценки многолетних изменений наземных экосистем под воздействием природных и антропогенных деструктивных факторов, процессов возобновления и сукцессионной динамики растительного покрова.

Будучи одной из наиболее экономически важных категорий земель России, сельскохозяйственные угодья в силу присущей им нерегулярности временной динамики отражательных характеристик потребовали разработки специализированного метода их распознавания по данным ДЗЗ. Метод распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных MODIS предполагает вычисление набора признаков, учитывающих особенности сезонной и межгодовой динамики отражательных характеристик, отличающих пашню от других сельскохозяйственных угодий и естественной растительности (Барталев и др., 2011б). Использование указанных признаков и алгоритма классификации LAGMA позволило создать карту пахотных земель России и технологию ее ежегодного обновления.

Выполненные исследования продемонстрировали возможность распознавания лесов, различающихся преобладающей породой деревьев, по временным сериям спутниковых данных MODIS (Жарко, Барталев, 2014). Полученная карта лесов России отражает пространственное распределение двенадцати выделенных по критерию преобладающей породы классов лесных экосистем. При этом в основу метода картографирования было положено использование еженедельных композитных изображений MODIS в красном и ближнем ИК спектральных каналах, отражающих различия фенологической динамики древесных пород.

Исследования продемонстрировали эффективность использования полученных в зимний период спутниковых данных, традиционно считающихся малоинформативными при изучении растительности, для картографирования и оценки характеристик лесного покрова. Так, параметризация модели зависимости отражательной способности покрытого снегом лесного покрова от величины запаса стволовой древесины, и применение полученной зависимости к спутниковым данным MODIS позволило разработать карту запасов древесины в лесах России (Ховратович и др., 2013; Жарко, Барталев, 2015).

Глава 2

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

2.1. Принципы атмосферной коррекции данных ДЗЗ в оптическом диапазоне

Одной из распространённых форм ДЗЗ является измерение космической системой интенсивности солнечного излучения, отраженного земной поверхностью. Из представленного на *рис. 2.1* распределения спектральной плотности энергетической освещенности на верхней и нижней границах атмосферы следует, что его максимум расположен в видимом диапазоне длин волн (0,4–0,8 мкм). Ослабление солнечного излучения при прохождении им атмосферы вызвано процессами рассеяния и поглощения различными ее компонентами (аэрозоли, водяной пар, атмосферные газы) даже при отсутствии облаков. Поэтому, в случаях, когда задачей ДЗЗ является измерение физических характеристик земной поверхности, необходимо осуществлять коррекцию влияния атмосферы.

В оптическом диапазоне существует два основных механизма взаимодействия солнечного излучения с атмосферой при прохождении по пути «Солнце – земная поверхность – сенсор»: *поглощение* газами (при перекрытии линии поглощения данного газа с волновым диапазоном спектрального канала сенсора) и *рассеяние* на частицах аэрозолей и молекулах газов. Основными газами, поглощающими солнечное излучение, являются кислород (O_2), озон (O_3), водяной пар (H_2O), углекислый газ (CO_2), метан (CH_4) и оксид азота (N_2O). Выбором диапазона длин волн спектральных каналов сенсора можно существенно снизить влияние процессов поглощения. Аэрозоли – это дисперсная система, состоящая из взвешенных в атмосфере мелких частиц. По своему происхождению выделяются антропогенные (производственные и бытовые выбросы в атмосферу) и естественные (извержения вулканов, песок и частицы почвы, дым от пожаров) источники аэрозолей. В зависимости от распределения по высоте выделяют тропосферные и стратосферные аэрозоли. Стратосферные аэрозоли возникают из-за извержения вулканов, могут иметь существенную оптическую толщину, простираются над значительной территорией и сохраняются в атмосфере от нескольких месяцев до нескольких лет.

Однако основная масса аэрозолей располагается в тропосферном слое. Природа образования их разнообразна и включает продукты промышленных выбросов, продукты горения биомассы, песок пустынь, продукты почвенной эрозии и прочее. Состав тропосферных аэрозолей изменчив как во времени, так и в пространстве (Kaufman et al., 1997).

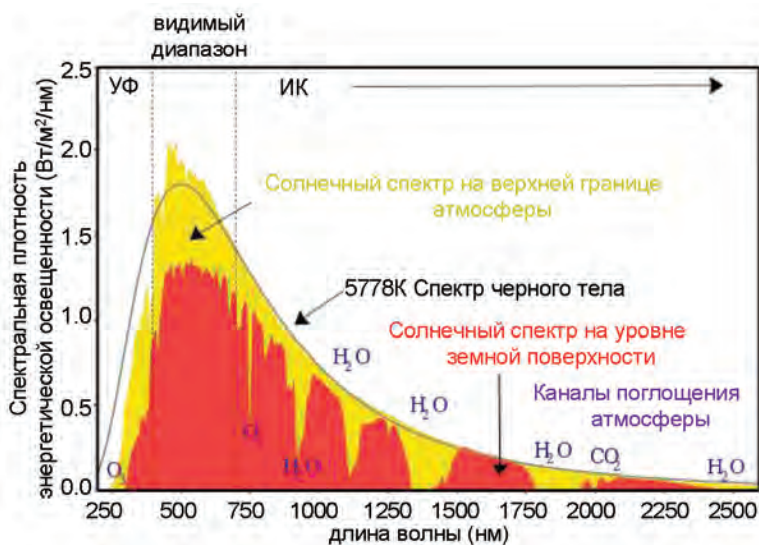


Рис. 2.1. Спектр солнечного излучения на верхней (желтым цветом) и нижней (красным цветом) границах атмосферы (<https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>)

Исторически первые попытки минимизации влияния атмосферы относятся к коррекции данных AVHRR в 80–90 гг. прошлого века. Среди полученных наборов данных наиболее известны Global Inventory Monitoring and Modeling System (GIMMS, Tucker, 1996) и Pathfinder AVHRR Land (PAL, James, Kalluri, 1994). Компенсация эффекта рассеяния в атмосфере достигалась за счет нормализации при комбинировании данных в различных спектральных каналах в вегетационные индексы (например, Normalized Difference Vegetation Index – *NDVI*, раздел 2.5, уравнение (2.44)). Минимизация влияния облаков осуществлялась путем построения композитных изображений на основе процедуры максимизации значений *NDVI* за выбранный временной интервал. Позднее для наборов данных GIMMS и PAL стали учитывать влияние молекулярного рассеяния Рэлея и озона на основе физических моделей, а также стратосферных аэрозолей на основе статистических методов обработки временных рядов данных. В работе (Moran et al., 1992) описана первая атмосферная коррекция на основе уравнения переноса с использованием наземных измерений параметров аэрозолей и водяного пара. Однако применение данного подхода на глобальном уровне было затруднено ввиду отсутствия необходимых измерений в таком объёме.

На сегодняшний день одной из наиболее распространенных моделей атмосферной коррекции является модель 6S (Second Simulation of a Satellite Signal

in the Solar Spectrum) (Vermote et al., 1997a,b, 2002; Vermote, Saleous, 2006), разработанная в Лаборатории атмосферной оптики г. Лиль (Франция). В дальнейшем в центре управления космическими полетами им. Годдарта NASA (шт. Мэриленд, США) на основе этой модели был создан алгоритм атмосферной коррекции для обработки данных MODIS (Vermote, Vermeulen, 1999). Этот алгоритм в настоящее время также используется для обработки данных Landsat TM/ETM+/OLI (Roy et al., 2014; http://landsat.usgs.gov/CDR_LSR.php) и VIIRS (http://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/D0001-M01-S01-026_JPSS_ATBD_VIIRS-Surface-Reflectance_A.pdf). Модель 6S учитывает эффекты поглощения газов (озон, водяной пар и другие), молекулярного (Рэля) и аэрозольного рассеяния (рис. 2.2).

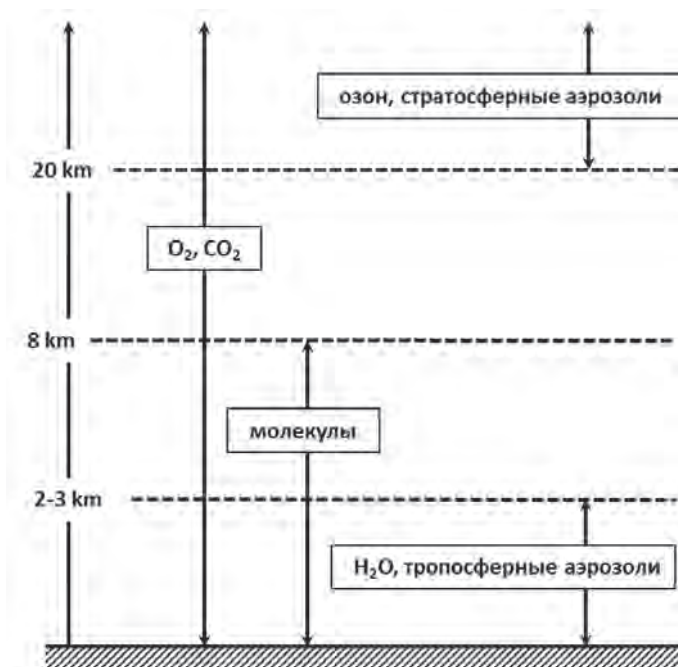


Рис. 2.2. Распределение по высоте компонентов атмосферы, влияющих на рассеяние и поглощение солнечного излучения в модели 6S

Последняя версия алгоритма (6SV) также учитывает эффект поляризации (Kotchenova et al., 2006). Задачей модели 6S является определение отражательной способности (коэффициента спектральной яркости – КСЯ, раздел 2.2, уравнение 2.4) земной поверхности при отсутствии влияния атмосферы. В предположении, что поверхность Земли является однородным и плоским ламбертовским отражателем, КСЯ на верхней границе атмосферы рассчитывается в соответствии с моделью 6S следующим образом:

$$\rho_{TOA} = Tg_{O_3} Tg_{OG} \left[\rho_{atm} + Tr_{atm} \frac{\rho_s}{1 - S_{atm} \rho_s} Tg_{H_2O} \right]. \quad (2.1a)$$

Данное уравнение решается относительно ρ_s – искомого КСЯ земной поверхности.

В уравнении используются следующие (параметрические) функции:

- $\rho_{TOA}(SZA, VZA, RA, P, Aer, U_{H_2O}, U_{O_3})$ – КСЯ на верхней границе атмосферы;
- $\rho_{atm}(SZA, VZA, RA, P, Aer, U_{H_2O})$ – коэффициент внутреннего отражения атмосферы;
- $Tr_{atm}(SZA, VZA, RA, P, Aer)$ – коэффициент полного пропускания атмосферы (вверх и вниз);
- $S_{atm}(P, Aer)$ – сферическое альbedo атмосферы;
- $Tg_{H_2O}(m, U_{H_2O})$ – коэффициент пропускания водяного пара;
- $Tg_{O_3}(m, U_{O_3})$ – коэффициент пропускания озона;
- $Tg_{OG}(m, P)$ – коэффициент пропускания прочих газов;

параметры (аргументы функций) следующие:

- SZA – Solar Zenith Angle – зенитный угол Солнца;
- VZA – View Zenith Angle – зенитный угол положения сенсора;
- RA – Relative Azimuth – относительный азимутальный угол между направлениями на сенсор и на Солнце;
- P – атмосферное давление, влияющее на количество молекул и концентрацию газов;
- U_{H_2O} – интегрированное по вертикали содержание водяного пара;
- U_{O_3} – интегрированное по вертикали содержание озона;
- m – нормализованная толщина атмосферы, $1/\cos(SZA) + 1/\cos(VZA)$;

$Aer(\tau_A, \omega_0, P_A)$ – набор параметров модели аэрозолей:

- τ_A – спектральная оптическая толщина аэрозолей;
- ω_0 – спектральное альbedo однократного рассеяния на аэрозолях;
- PA – индикатриса рассеяния аэрозолей.

Коэффициент внутреннего отражения атмосферы ρ_{atm} имеет следующие составляющие:

$$\rho_{atm} = \rho_R + \rho_{R+Aer} - \rho_R Tg_{H_2O/2}, \quad (2.16)$$

где $\rho_R(SZA, VZA, RA, P)$ – коэффициент отражения атмосферы за счет рассеяния Рэлея; $\rho_{R+Aer}(SZA, VZA, RA, Aer)$ – коэффициент отражения атмосферы за счет рассеяния Рэлея и на аэрозолях; $Tg_{H_2O/2}(m, U_{H_2O/2})$ – коэффициент пропускания водяного пара, рассчитанный для половины его концентрации.

Параметры атмосферы в уравнении (2.1) вводятся либо из предварительно рассчитанных опорных таблиц (Look-up Tables, LUT), либо вычисляются на основе полуэмпирических соотношений по данным ДЗЗ или с использованием данных реанализа климатических параметров. Например, для атмосферной коррекции данных MODIS или VIIRS используется следующая входная информация:

- продукты данных ДЗЗ, включая КСЯ на верхней границе атмосферы, маску облаков, параметры аэрозолей, водяного пара и озона;
- архивные метеорологические данные реанализа, включая атмосферное давление на земной поверхности, параметры водяного пара и озона;
- вспомогательные модельные данные – опорные таблицы (LUT) параметров атмосферы, рассчитанных на основе моделирования.

Исследования чувствительности алгоритма атмосферной коррекции к параметрам показали, что точность коррекции в наибольшей степени зависит от давления водяного пара и оптической толщины аэрозолей (Aerosol Optical Thickness, AOT). Наибольшую сложность представляет расчет последней. В случае данных MODIS аэрозольный алгоритм использует средний ИК канал (2,11–2,16 мкм), где эффектом влияния аэрозолей можно пренебречь, для оценки значений в каналах, в которых КСЯ земного покрова мал и влияние аэрозолей значительно, например, для голубого (0,46–0,48 мкм) и красного (0,62–0,67 мкм) каналов. В целом аэрозольный алгоритм представляет собой полуэмпирический подход, в котором вычисляются основные параметры (оптическая толщина и распределение размеров частиц аэрозолей) в зависимости от четырех базовых типов моделей: 1) континентальные аэрозоли, 2) аэрозоли от горения биомассы, 3) аэрозоли над промышленными/урбанизированными территориями, 4) песчаные аэрозоли (Kaufman et al., 1997).

Следует отметить, что алгоритм 6S корректирует не только атмосферные эффекты, но и эффекты сопряжения «Земля-атмосфера». В частности, проводится поправка *эффекта границы (adjacency effect)*, состоящего в наблюдаемом размывии границ объектов ландшафта из-за попадания на сенсор не только фотонов, отраженных от данного участка, но также фотонов, отраженных от соседних участков после дополнительного рассеяния в атмосфере (рис. 2.3). Этот эффект моделируется сверткой распределения значений КСЯ в окрестности пикселя и атмосферной *функции размывия точки (point spread function)* для аэрозолей и молекул газов. На заключительном этапе проводится коррекция *эффекта сопряжения ДФСО* (двухлучевая функция спектрального отражения, см. раздел 2.2, *BRDF coupling effect*) – радиационного сопряжения ДФСО земной поверхности и ДФСО атмосферы. Напомним, что атмосферная коррекция производится согласно уравнению (2.1) в предположении, что поверхность Земли является ламбертовской. Однако земная поверхность обладает существенной анизотропией ввиду неоднородности растительного покрова (см. раздел 2.2). Коррекция влияния анизотропии земной поверхности производится путем использования либо архивных спутниковых данных, либо модельных данных для ДФСО растительного покрова. Дальнейшую информацию по теоретическим основам модели 6S можно получить в руководстве пользователя (<http://6s.ltdri.org/pages/manual.html>).

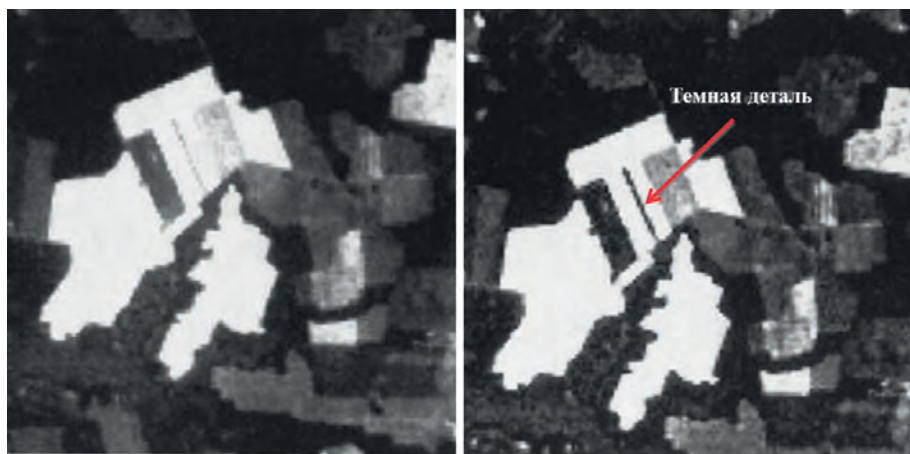


Рис. 2.3. Иллюстрация коррекции эффекта границы (*adjacency effect*) — изображение с узкой контрастной деталью до (слева) и после (справа) атмосферной коррекции (по данным Vermote et al., 1997a)

Наряду с моделью 6S существует ряд других подходов к атмосферной коррекции данных ДЗЗ (Kotchenova et al., 2008):

- Численное моделирование методом Монте-Карло, с помощью которого рассчитывается прохождение фотонов через атмосферу с учетом функций распределения коэффициентов поглощения и рассеяния на молекулах газов и частицах аэрозолей, указанных на *рис. 2.2*. Этот метод считается эталонным для проверки прочих.
- Опорные таблицы Колсона — табулированные значения отраженного и пропущенного излучения. Рассчитываются на основе моделирования рассеяния Рэлея в плоскопараллельной непоглощающей атмосфере.
- MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) — код, моделирующий процессы переноса излучения в оптическом и тепловом диапазонах, включая эффекты поглощения, теплового излучения и рассеяния молекул газов и прочих компонент атмосферы, а также отражение и тепловое излучение поверхности Земли и солнечное излучение.
- RT3 — код, разработанный для плоскопараллельной вертикально-неоднородной атмосферы, состоящей из случайно ориентированных частиц. Код работает как в оптическом, так и тепловом диапазонах спектра и стабилен для больших величин оптической толщины атмосферы.
- SHARM (Spherical HARMonics) — код, основанный на одномерном уравнении переноса для оптического диапазона. Уравнение решается методом разложения по сферическим базисным функциям. Код включает несколько встроенных моделей КСЯ поверхности.

Ниже мы рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих результаты применения модели 6S для атмосферной коррекции. Месячный композит по данным Landsat ETM+ (разрешение 30 м) над континентальной частью США за июль 2010 года показан на *рис. 2.4a*: слева — до, справа — после атмосферной коррекции.

Атмосферная коррекция проводилась, используя код 6SV и данные MODIS для параметров аэрозолей, водяного пара, озона и др. (Roy et al., 2014). Эффект «дымки», возникающий из-за атмосферного поглощения и рассеяния на аэрозолях и молекулах газов, указанных на *рис. 2.2*, эффективно удаляется алгоритмом 6SV. Атмосферная коррекция невозможна при наличии облаков – остаточная облачность отчетливо видна на данных после коррекции. Количественная оценка влияния атмосферной коррекции на результаты измерений в каналах прибора и значения спектральных индексов приведена на *рис. 2.4б*, где сравниваются гистограммы данных до и после коррекции.

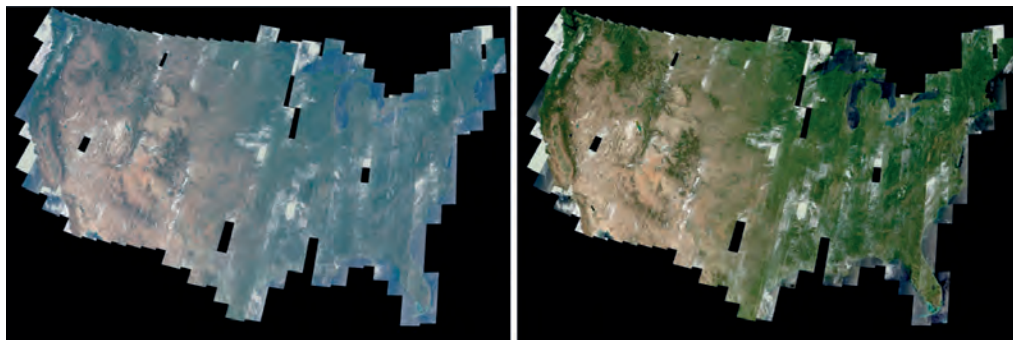


Рис. 2.4а. Месячный композит по данным Landsat ETM+ для континентальной части США за июль 2010 до (слева) и после (справа) атмосферной коррекции алгоритмом 6SV (изображение в натуральных цветах) (по данным Roy et al., 2014)

Данный пример показывает, что за счет эффектов рассеяния и поглощения в атмосфере значения КСЯ в видимых каналах увеличиваются, а значения индекса *NDVI* уменьшаются. Влияние атмосферы в ближней ИК области спектра (не показано на рисунке) приводит к некоторому сужению динамического диапазона измерений.

Далее рассмотрим пример, иллюстрирующий влияние параметров модели 6S на результаты атмосферной коррекции. Глобальная сеть AERONET (Holben et al., 1998) включает около 1000 станций с фотометрами (*рис. 2.5*), регулярно в течение дня измеряющими оптическую толщину аэрозолей, распределение размеров аэрозольных частиц и содержание водяного пара, а также прочие параметры атмосферы. Данные фотометров проходят предварительную обработку, включающую фильтрацию облаков и контроль качества. В рамках проекта по валидации продуктов VIIRS – КСЯ, вегетационных индексов *NDVI* и *EVI* (раздел 2.5, уравнения (2.44) и (2.50)) была создана автоматическая система по сбору наземных измерений AERONET и соответствующих (в пространственно-временном интервале) спутниковых данных VIIRS (Shabanov et al., 2015). Данные VIIRS в окне 101×101 пиксель размером 375 м с центром на координатах станции усреднялись для сравнения с точечными измерениями AERONET. Пример результатов работы системы показан на *рис. 2.6* для станции метеорологических наблюдений Harvard Forest (42,5328° с.ш., 72,1885° в.д.) в шт. Массачусетс, США. Тип растительности в районе станции – смешанный лес с преобладанием широколиственных пород.

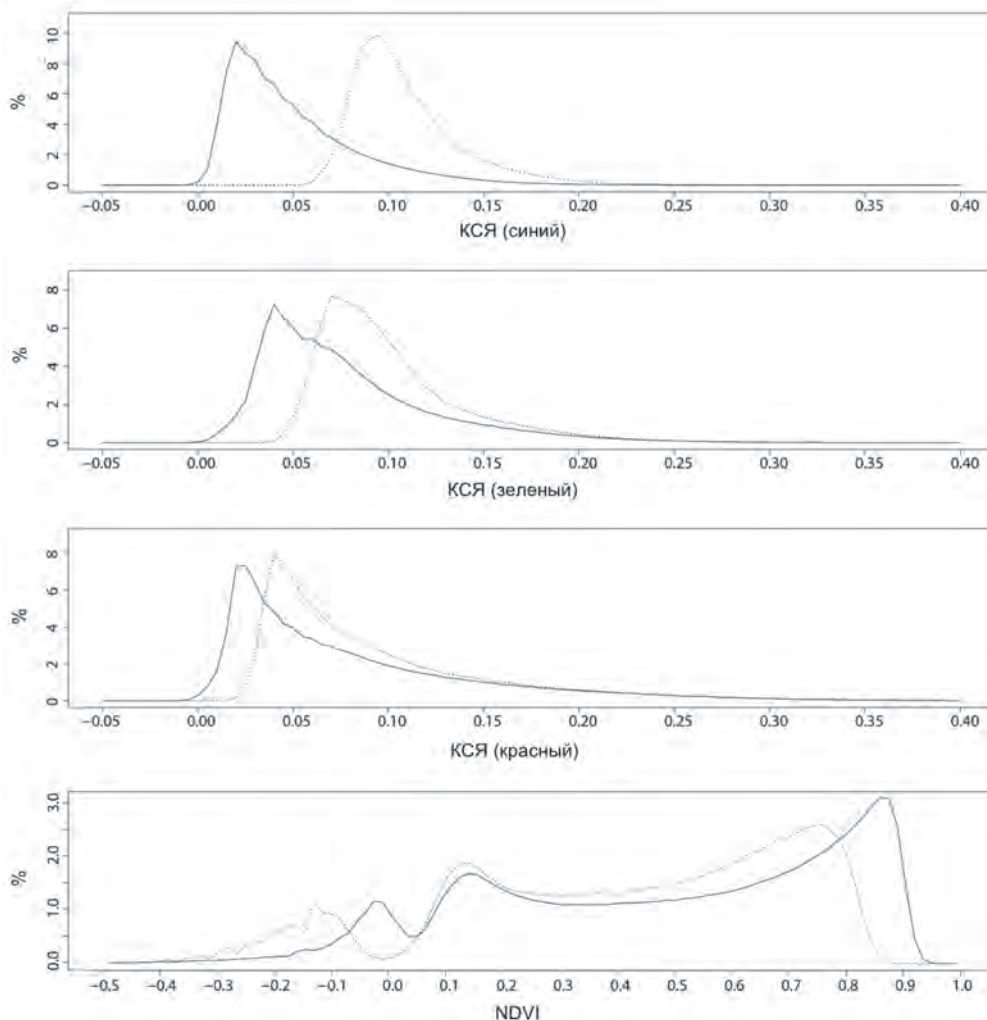


Рис. 2.46. Гистограммы значений КСЯ в каналах Landsat ETM+ (сверху вниз: синий, зеленый, красный) и вегетационного индекса NDVI до (пунктирная линия) и после (сплошная линия) атмосферной коррекции (по данным Roy et al., 2014)

На рис. 2.6 приведены временные ряды значений КСЯ и вегетационных индексов (черным — по результатам измерений VIIRS на верхней границе атмосферы; синим — после атмосферной коррекции на основе параметров атмосферы, рассчитанных по данным VIIRS; красным — по результатам атмосферной коррекции на основе измерений станциями AERONET параметров атмосферы). Показаны также временные ряды значений некоторых параметров атмосферы (оптической толщины аэрозолей на длинах волн около 0,55 мкм, концентраций водяного пара и озона) по данным стандартных продуктов VIIRS (синим) и по результатам измерений станции AERONET (красным). Представлены данные об изменчивости геометрии спутниковых наблюдений и количестве доступных для анализа пикселей.

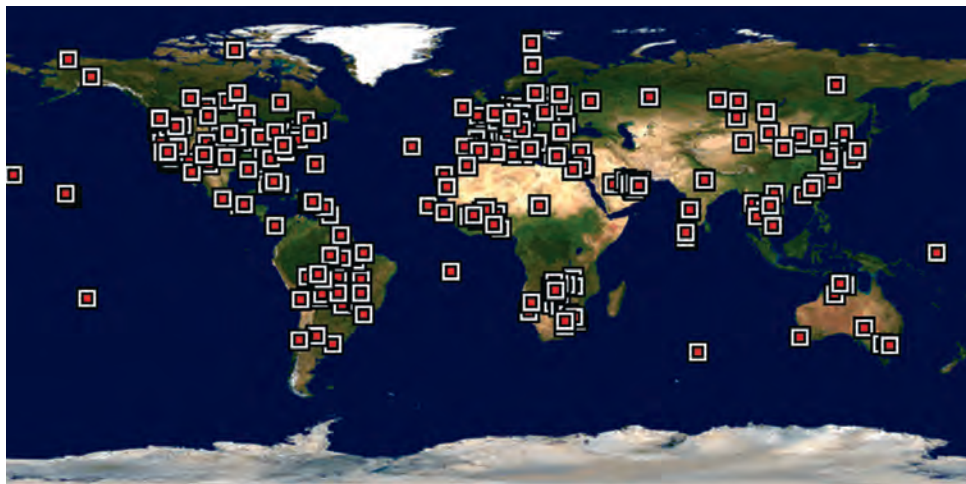


Рис. 2.5. Глобальное распределение станций сети AERONET для автоматического измерения оптических параметров атмосферы, необходимых для коррекции ее влияния (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)

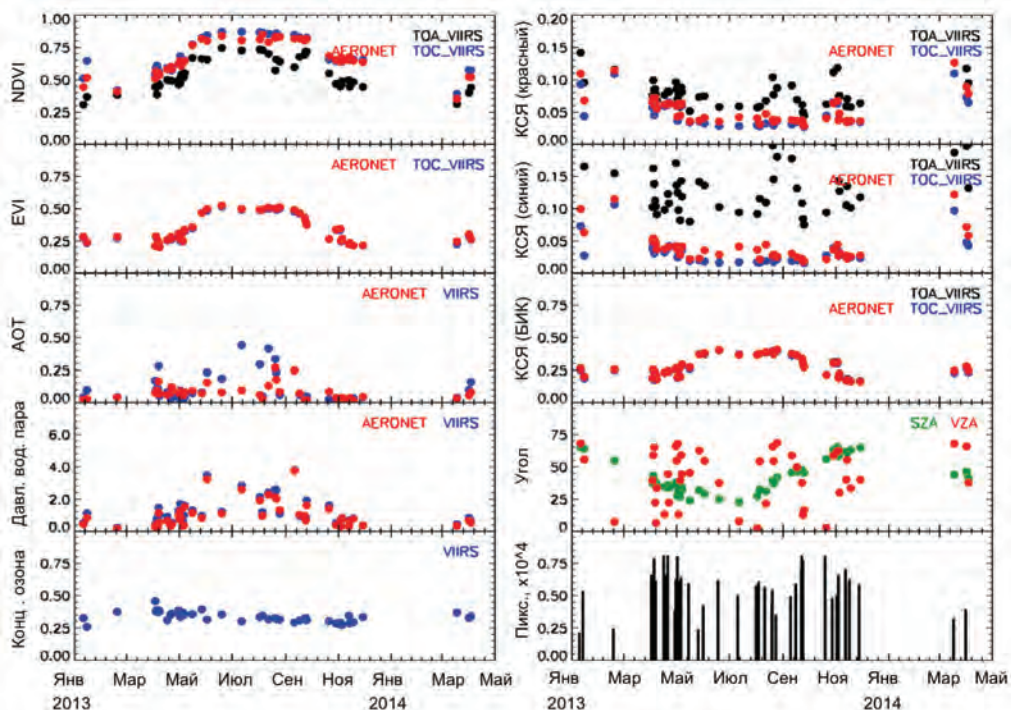


Рис. 2.6. Анализ чувствительности алгоритма атмосферной коррекции к входным параметрам с использованием наземных измерений станций сети AERONET. Показаны временные ряды вегетационных индексов, КСЯ и основных параметров алгоритма атмосферной коррекции для станции Harvard forest (42,5328° с.ш., 72,1885° в.д.), штат Массачусетс, США (по данным Shabanov et al., 2015)

На данной станции наблюдается существенная сезонность вегетационных индексов: 0,5–0,8 для $NDVI$ и 0,25–0,50 для EVI после атмосферной коррекции, при этом вариации КСЯ сильно зашумлены. Оптическая толщина аэрозолей, как правило, не высока ($< 0,1$); содержание водяного пара умеренное (увеличивается летом). Несмотря на умеренные значения данных параметров, эффект атмосферной коррекции значителен для красного и синего каналов, не существенен для ближнего ИК канала. После коррекции данных значения КСЯ в красном и особенно в синем каналах снижаются, в ближнем ИК канале изменения незначительны. Значения индекса $NDVI$ возрастают, и его сезонная кривая становится менее подверженной суточным вариациям из-за влияния атмосферы. В силу своей концепции значения индекса EVI являются малочувствительными к выбору параметров атмосферы, используемых для коррекции. Заметим, что в летний период (июнь–август) возникает существенная разница в оценке оптической толщины аэрозолей между измерениями AERONET и данными стандартных продуктов VIIRS. Как показано в (Shabanov et al., 2015), VIIRS завышает значения оптической толщины аэрозолей на границе облаков, что приводит к занижению значений КСЯ в оптическом диапазоне и завышению $NDVI$. Однако усиленная фильтрация облаков, включающая коррекцию эффекта границы, способна минимизировать влияние указанного фактора. Обратим внимание еще на один эффект, выражающийся в том, что в сентябре–октябре оптическая толщина аэрозолей низкая, но атмосферная коррекция значительно изменяет значения КСЯ в оптическом диапазоне спектра. Этот эффект возникает из-за увеличения зенитного угла Солнца, что приводит к увеличению полной оптической толщины прохождения лучей пропорционально $1/\cos(SZA)$.

2.2. Моделирование коэффициента спектральной яркости

Для оценки биофизических параметров растительного покрова на основе данных ДЗЗ необходима модель его взаимодействия с солнечным излучением. Исторически моделирование взаимодействия солнечного излучения с растительной средой в оптическом диапазоне на основе физических принципов проводилось по двум (взаимно дополняющим) направлениям, а именно: 1) моделирование отражения от поверхности растительной среды и 2) моделирование объемного рассеяния растительной средой. Каждое из этих направлений представлено рядом моделей, в основе которых, как правило, лежат принципы геометрической оптики для моделирования поверхностного отражения растительным покровом и уравнение переноса для описания рассеяния внутри растительной среды. Наличие двух подходов к моделированию взаимодействия солнечного излучения с растительной средой, пожалуй, отражает наличие корпускулярно-волнового дуализма природы света. В данном разделе будут рассмотрены вопросы моделирования отражения; моделированию объемного рассеяния среды посвящен раздел 2.3.

Для количественного описания отражательной способности растительной поверхности используются следующие функции. Пусть мощность светового излучения характеризуется *потоком* F [Вт]. Тогда плотность потока излучения на еди-

ницу площади поверхности A и единицу телесного угла Ω характеризуется *интенсивностью* I [Вт/(м²·ср)]:

$$I \equiv \frac{\partial^2 F}{\partial A \partial \Omega \cos \theta} \quad (2.2)$$

Направление телесного угла Ω задано зенитным θ и азимутальным φ углами. Интерпретация физического смысла телесного угла и площади поверхности зависит от типа вычислений: 1) для расчета потоков на излучателе dA – площадь элемента излучателя, а $d\Omega$ – телесный угол, в который рассеивается энергия излучателя; 2) для расчета потоков на сенсоре dA – площадь элемента сенсора, а $d\Omega$ – раствор телесного угла, под которым виден излучатель. Анизотропия отражательных свойств различных поверхностей измеряется относительно ламбертовской поверхности – изотропного отражателя, для которого интенсивность отраженного излучения не зависит от направления (рис. 2.7а). Для ламбертовской поверхности выполняется закон косинуса Ламберта – величина потока, отраженного от ламбертовской поверхности, пропорциональна косинусу угла между направлением визирования и нормалью к поверхности (рис. 2.7б). Оба утверждения (для интенсивности и потока) математически эквивалентны. Физически они выражают тот факт, что хотя интенсивность отраженного излучения изотропна, при пологом визировании площадка видна в меньшем растворе телесного угла и, следовательно, меньшее количество энергии попадает на сенсор. Косинус угла визирования служит нормировочным коэффициентом для перевода изотропной величины (интенсивность) в анизотропную (поток).

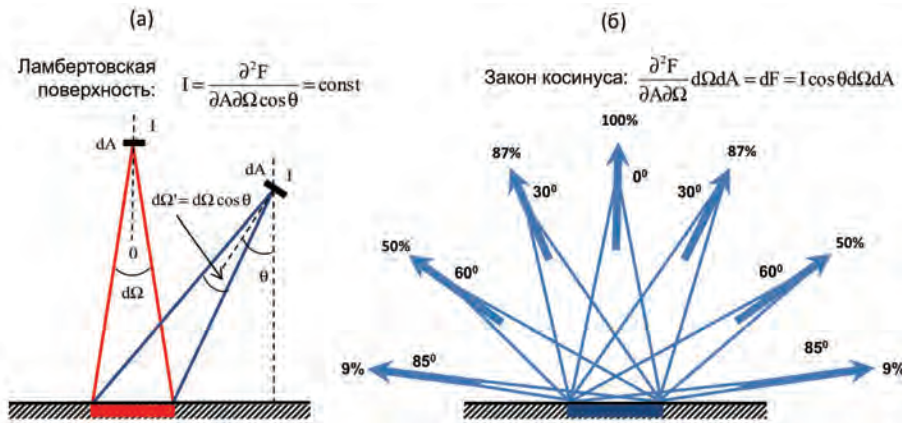


Рис. 2.7. Измерение отраженной энергии от ламбертовской поверхности: (а) интенсивность отраженного излучения не меняется в зависимости от угла визирования; (б) плотность потока отраженного излучения пропорциональна косинусу угла визирования (закон косинуса Ламберта)

Пусть падающее излучение в направлении (θ_i, φ_i) характеризуется интенсивностью I^i , а излучение, отраженное в направлении (θ_v, φ_v) имеет интенсивность I^v (θ – зенитный, φ – азимутальный углы, характеризующие направление распространения излучения). Отражательная способность растительного покрова характе-

ризуется *двухлучевой функцией спектрального отражения* (ДФСО), определенной как отношение плотности отраженного потока излучения на единицу площади поверхности и телесного угла в направлении $\Omega^v(\theta_v, \varphi_v)$ к плотности падающего потока в направлении $\Omega^i(\theta_i, \varphi_i)$ [безразмерная величина] (Росс, Егоров, 1983):

$$(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^v}{\partial A \partial \Omega^v} \bigg/ \frac{\partial^2 F^i}{\partial A \partial \Omega^i} = \frac{I^v(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v}{I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i}. \quad (2.3)$$

Однако чаще используется термин *индикатриса отражения* (ИО) или *коэффициент спектральной яркости* (КСЯ), определенный как отношение плотности отраженного от данной поверхности потока излучения на единицу площади поверхности и телесного угла $\Omega^v(\theta_v, \varphi_v)$ к интенсивности излучения, отраженного от ламбертовской поверхности, при тех же условиях освещения и наблюдения [безразмерная величина] (Росс, Егоров, 1983; Росс, Маршак, 1984):

$$КСЯ(\theta_v, \varphi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^v}{\partial A \partial \Omega^v} \bigg/ \frac{\partial^2 F_L^v}{\partial A \partial \Omega^v \cos \theta_v} = \frac{I^v(\theta_v, \varphi_v) \cos \theta_v}{(1/\pi) \int_{2\pi^-} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}. \quad (2.4)$$

Здесь и далее мы используем следующие обозначения для пределов интегрирования: $2\pi^-$ – по нижней полусфере, $2\pi^+$ – по верхней полусфере, 4π – по всей сфере. Для понимания смысла выражения в знаменателе заметим, что поскольку ламбертовская поверхность отражает все приходящее излучение равномерно по углам с интенсивностью I^0 , верно соотношение:

$$(1/\pi) \int_{2\pi^-} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i = (1/\pi) \int_{2\pi^+} I^0 \cos \theta_v d\Omega^v = I^0. \quad (2.5)$$

КСЯ связан с ДФСО следующим соотношением (Росс, Егоров, 1983):

$$КСЯ(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) = \frac{(1/2) \int_{2\pi^-} ДФСО(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}{\int_{2\pi^-} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}. \quad (2.6)$$

В западной литературе принята иная терминология описания отражательных свойств поверхности. Двухлучевая функция распределения отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF [ср⁻¹]) определена как отношение интенсивности отраженного излучения в направлении $\Omega^v(\theta_v, \varphi_v)$ к плотности падающего потока на единицу площади:

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) \equiv \frac{\partial^2 F^v}{\partial A \partial \Omega^v \cos \theta_v} \bigg/ \frac{\partial F^i}{\partial A} = \frac{I^v(\theta_v, \varphi_v)}{\int_{2\pi^-} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}. \quad (2.7)$$

Для ламбертовской поверхности ($I^v = \text{const}$) в соответствии с соотношением (2.5) $BRDF = 1/\pi$. В зависимости от типа падающего и отраженного излучения

выделяются следующие 4 класса (рис. 2.8) коэффициентов отражения поверхности [безразмерные величины] (Schaepman-Strub et al., 2006):

- **BRF** (Bidirectional Reflectance Factor) – отношение мононаправленного потока излучения, отраженного от данной поверхности, к отраженному от идеально рассеивающей ламбертовской поверхности потоку на единицу ее площади при одинаковых условиях освещения мононаправленным потоком излучения.
- **DHR** (Directional-Hemispherical Reflectance) – отношение потока излучения, отраженного по всей верхней полусфере, к падающему мононаправленному потоку на единицу площади поверхности. Эта величина соответствует альбедо для мононаправленного освещения.
- **HDRF** (Hemispherical-directional Reflectance Factor) – отношение мононаправленного потока отраженного излучения к падающему потоку из всей верхней полусферы.
- **BHR** (Bi-hemispherical Reflectance) – отношение потока излучения, отраженного по всей верхней полусфере, к падающему потоку из всей верхней полусферы на единицу площади поверхности. Эта величина соответствует альбедо для диффузного освещения.

BRF соответствует наиболее типичному формату данных ДЗЗ в оптическом диапазоне спектра – падающее излучение является мононаправленным (диффузная компонента падающего излучения удалена в результате атмосферной коррекции), и отраженное излучение регистрируется в узком телесном угле сенсора (мононаправленный отраженный поток). Математически BRF определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} BRF(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v) &\equiv \frac{dF^v}{dF_L^v} = \frac{\partial^2 F^v}{\partial A \partial \Omega^v \cos \theta_v} \bigg/ \frac{\partial^2 F_L^v}{\partial A \partial \Omega^v \cos \theta_v} = \\ &= \frac{I^v(\theta_v, \varphi_v)}{(1/\pi) \int_{2\pi^-} I^i(\theta_i, \varphi_i) \cos \theta_i d\Omega^i}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Для ламбертовской поверхности ($I^v = \text{const}$) и в соответствии с соотношением (2.5) $BRF = 1$. Сравнивая выражения для BRF и BRDF, видим, что они эквивалентны с точностью до π . Наш обзор литературы показывает, что КСЯ рассчитывался по выражению (2.4) до 90-х годов прошлого века (Росс, Егоров, 1983; Росс, Маршак, 1984), однако позднее под КСЯ стало пониматься выражение для BRF (Маршак, 1992). В этой главе мы придерживаемся последнего определения КСЯ. Заметим, что КСЯ/BRF выражает исключительно величину отклонения отражательной способности данной поверхности от такой же величины для идеально рассеивающей ламбертовской поверхности, и его зависимость от угла наблюдения обусловлена именно анизотропией отражательных свойств поверхности и не связана с корректирующим коэффициентом $\cos(\theta)$. КСЯ/BRF обладает следующими свойствами: 1) изменяется в зависимости от направления падения и отражения излучения; 2) зависит от типа падающего и отраженного излучения (прямое или диф-

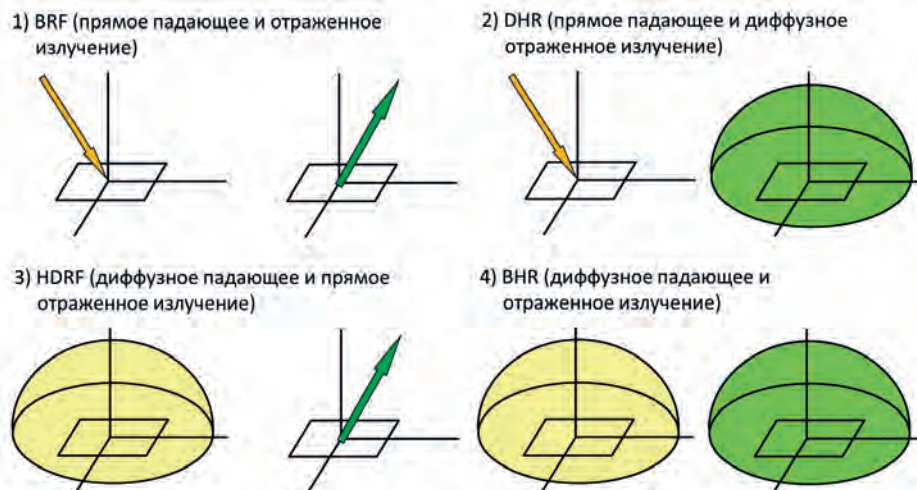


Рис. 2.8. Классификация коэффициентов отражения по типу падающего и отраженного излучения (прямое или диффузное)

фузное); 3) зависит от длины волны излучения; 4) зависит от физических свойств отражающей поверхности – рельефа, а также плотности и неоднородности пространственного распределения объектов растительного покрова.

В лабораторных условиях КСЯ измеряют (среди прочих инструментов) гониометром, состоящим из радиометра и подвижной опоры, позволяющей перемещать сенсор относительно источника излучения в различных угловых направлениях по полусфере. Измерению угловой зависимости КСЯ из космоса посвящен ряд проектов, в том числе POLDER (Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances) и MISR (Multiangular Spectral Radiometer) (Diner et al., 1998).

Примеры типичных угловых профилей нормализованных КСЯ, построенных на основе многолетних данных MODIS, представлены на рис. 2.9. Как правило, КСЯ показывается в плоскости солнечного вертикала (*principal plane*), проходящей перпендикулярно земной поверхности через линию направления падающего потока излучения. Выделяют два вида формы профиля КСЯ – в виде чаши, где минимум достигается в надире и наблюдается рост значений с увеличением угла визирования, и в виде перевернутой чаши, демонстрирующей обратное поведение. Форма углового профиля КСЯ также характеризуется асимметрией рассеяния (прямое или обратное). Важной особенностью формы профиля КСЯ является наличие локального максимума КСЯ при совпадении направлений освещения и наблюдения. Это явление называется эффектом *обратного блеска* (*hot-spot effect*). Эффект возникает из-за того, что тени на 3D объекте не видны только при наблюдении в направлении на Солнце (рис. 2.10). В целом, перечисленные выше особенности формы КСЯ возникают из-за неоднородности растительной поверхности (неоднородная структура и угловая анизотропия рассеяния фитоэлементов). В работе (Li, Strahler, 1992) к факторам, влияющим на форму профиля КСЯ, отнесены такие характеристики, как форма кроны деревьев, площадь проективного покрытия, длина волны излучения и величина зенитного угла положения Солнца.

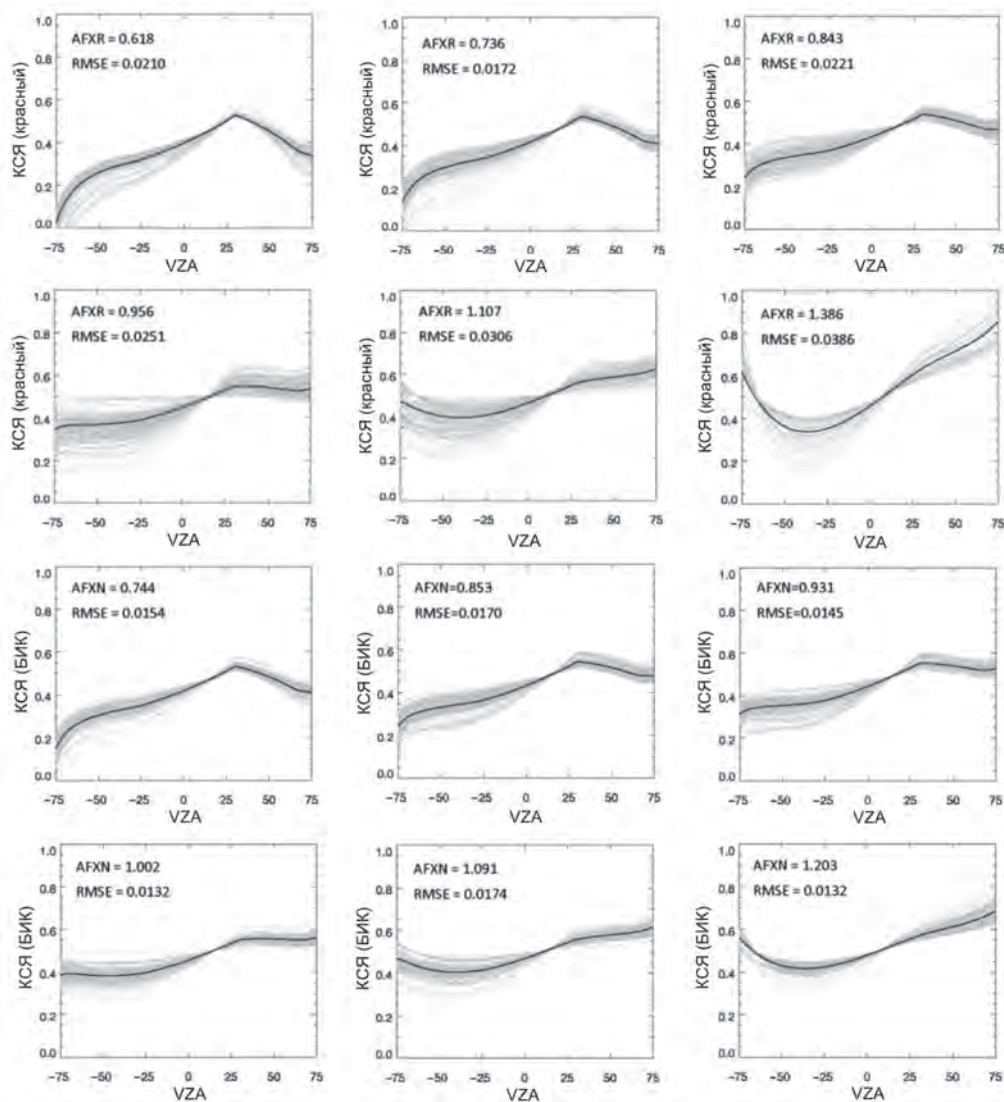


Рис. 2.9. Примеры угловых профилей нормализованных значений КСЯ в плоскости солнечного вертикала из базы опорных данных алгоритма MODIS BRDF/Albedo. Система классов КСЯ создана на основе обработки данных многолетних наблюдений прибора MODIS алгоритмом AMBRALS (Wanner et al., 1997). Черной линией показано статистическое среднее класса профиля, а серым — вариации внутри класса (по данным Jiao et al., 2015)

Обзор подходов к моделированию КСЯ показывает, что довольно часто для этих целей используются относительно простые модели, основанные не строго на физических законах, а на полуэмпирически подобранных функциональных зависимостях, выражающих свойства наблюдаемой земной поверхности. Одной из



Рис. 2.10. Влияние 3D структуры растительности на КСЯ. Кроны деревьев бросают тень на подстилающую поверхность и соседние деревья. При совпадении направлений освещения и наблюдения тени исчезают и освещенность достигает максимума (слева). Это явление называется эффектом обратного блеска. На фото справа приведена ситуация, когда Солнце находится перед наблюдателем (видны тени)

известных моделей такого рода является модель RPV (Rahman-Pinty-Verstraete) (Rahman et al., 1993). Эта модель получена на основе модели Миннаерта (Minnaert, 1941) для коэффициента отражения поверхности Луны, выведенной из принципа взаимности падающего и отраженного лучей (траектория фотона в прямом и обратном направлениях движения идентична), а также фотометрических соотношений:

$$\rho(\theta_i, \theta_v) = \rho_0 \cos^{k-1}(\theta_i) \cos^{k-1}(\theta_v), \quad (2.9)$$

где ρ – моделируемый коэффициент отражения при наклонном визировании; ρ_0 – это коэффициент отражения при излучении, падающем в надир и отраженном в зенит; параметр k (0–1) контролирует анизотропию по отношению к углам падения и отражения. Формулировка оригинальной модели Миннаерта была расширена таким образом, чтобы описать особенности отражения от неоднородного растительного покрова: анизотропию прямого и обратного рассеяния, а также эффект обратного блеска (рис. 2.10). RPV модель формулируется следующим образом:

$$\rho(\theta_i, \theta_v, \phi) = \rho_0 M(\theta_i, \theta_v, k) F_{HG}(\Theta_{HG}, g) H(\rho_0, G), \quad (2.10a)$$

$$M(\theta_i, \theta_v, k) = \frac{\cos^{k-1}(\theta_i) \cos^{k-1}(\theta_v)}{[\cos(\theta_i) + \cos(\theta_v)]^{1-k}}, \quad (2.10б)$$

$$F_{HG}(\Theta_{HG}, g) = \frac{1 - \Theta_{HG}^2}{[1 + 2\Theta_{HG} \cos(g) + \Theta_{HG}^2]^{3/2}}, \quad (2.10в)$$

$$\cos(g) = \cos(\theta_i) \cos(\theta_v) + \sin(\theta_i) \sin(\theta_v) \cos(\phi), \quad (2.10г)$$

$$H(\rho_0, G) = 1 + \frac{1 - \rho_0}{1 + G}, \quad (2.10д)$$

$$G = \sqrt{\operatorname{tg}^2(\theta_i) + \operatorname{tg}^2(\theta_v) - 2\operatorname{tg}(\theta_i)\operatorname{tg}(\theta_v)\cos(\phi)}, \quad (2.10е)$$

где θ_i и θ_v – зенитные углы положения Солнца и сенсора соответственно; ϕ – относительный азимутальный угол между направлениями на Солнце и сенсор; $\cos(g)$ – косинус угла между направлениями падающего (i) и отраженного (v) излучения (фазовый угол); F_{HG} – это функция Хенуеу-Гринштейна, описывающая анизотропию рассеяния; параметр Θ_{HG} контролирует относительное преобладание прямого ($0 \leq \Theta_{HG} \leq 1$) и обратного ($-1 \leq \Theta_{HG} \leq 0$) рассеяния. Эффект обратного блеска моделируется функцией $H(\rho_0, G)$, достигающей своего максимума при условии совпадения направлений на Солнце и сенсор ($G = 0$). Для визуализации влияния различных параметров на форму КСЯ был разработан программный продукт Anisview (<http://forest.jrc.ec.europa.eu/download/software/anisview/>). К достоинствам полуэмпирических моделей относится их компактность и относительно малое число необходимых параметров, что удобно для их практического применения. Существенный недостаток таких моделей состоит в том, что они не описывают механизм рассеяния фотонов на элементах растительности и, как следствие, ограничены в возможностях оценки структурных параметров растительной среды.

Рассмотрим физическую модель (Li, Strahler, 1992), основанную на принципах геометрической оптики. Исторически эта модель была разработана для хвойного леса с четко выраженной структурой (кроны отдельно стоящих деревьев). При освещении такой среды Солнцем кроны деревьев бросают тень на подстилающую поверхность и соседние деревья, что приводит к выраженному эффекту обратного блеска (рис. 2.10). В модели геометрической оптики КСЯ описывается как чисто геометрическое явление на ландшафте. Форма объектов, плотность и конфигурация их расположения являются основными переменными, определяющими соотношение освещенной/затененной части объектов и подстилающей поверхности, наблюдаемых с определенного направления при данном направлении освещения. КСЯ представляется как взвешенная сумма КСЯ освещенных и затененных участков деревьев и напочвенного покрова. Этот подход описывает только однократное рассеяние фотонов, что применимо для видимого диапазона, но недостаточно для ближней ИК области спектра, где эффект многократного рассеяния существенен.

Для простоты последующих расчетов КСЯ деревьев и напочвенного покрова в тени предполагается равным нулю. КСЯ может быть вычислен следующим образом:

$$R(i, v) = \frac{\int R(s) \cos(i, s) \cos(v, s) \delta(s_i) \delta(s_v) ds}{A \cos(\theta_i) \cos(\theta_v)}, \quad (2.11)$$

где $R(s)$ – коэффициент отражения элементарной площадки ds ; $\cos(i, s)$ – косинус угла между направлением падающего излучения (i) и нормалью к площадке ds ; $\cos(v, s)$ – то же, но для направления наблюдения; $\delta(\dots)$ – индикаторная функция, равная 1, если элементарная площадка пикселя ds освещена (s_i) или наблюдается (s_v) и 0 в противном случае. Направления (i) и (v) определены зенитными углами Солнца (θ_i), сенсора (θ_v) и относительным азимутальным углом ϕ между ними. Интеграл берется по площади пикселя A . Предположим, что в пикселе представлены два типа поверхностей – поверхность напочвенного покрова и поверхность крон деревьев, обладающие ламбертовскими свойствами и коэффициентами отражения G (ground) и C (crown) соответственно. В этом случае уравнение (2.11) может быть разложено на компоненты отражения от земной поверхности и от крон:

$$R(i, v) = G \frac{A_G}{A} + C \frac{I_{A_c}}{A \cos(\theta_i) \cos(\theta_v)} \int \cos(i, s) \cos(v, s) ds \equiv G \frac{A_G}{A} + C \frac{A_c}{A}, \quad (2.12)$$

где коэффициенты A_G/A и A_c/A соответствуют пропорциям величин площади освещенных и наблюдаемых участков напочвенного покрова и крон соответственно. С учетом того факта, что объединение множеств A_G и A_c есть пересечение множеств одновременно освещенных и наблюдаемых элементов, A_G и A_c достигают максимума при совпадении направлений (i) и (v). Следовательно, это уравнение учитывает эффект обратного блеска. Еще одним важным следствием данного уравнения является тот факт, что КСЯ определяется не только коэффициентами отражения объектов (G и C), но и структурой среды (A_G и A_c).

Уровень сложности вычисления компонент в уравнении (2.12) (напочвенный покров и кроны деревьев) сильно зависит от конфигурации ландшафта. Самый простой случай соответствует разреженному лесному пологу, когда отсутствует эффект взаимного затенения деревьев. Предположим, что кроны представлены сфероидами с полуосью b , горизонтальным радиусом r и высотами расположения центров сфероидов h , равномерно распределенными в диапазоне $[h_1; h_2]$. Сфероиды распределены в пространстве со средней плотностью d в соответствии с пуассоновским случайным процессом (статистически независимо и равномерно распределены в соответствии с законом Пуассона). Для удобства вычислений теней от сфероидных объектов произведем замену переменных и перейдем к зенитному углу θ' , при котором сфероид создает на подстилающей поверхности такую же тень, как и сфера:

$$\theta' = \arctg \left[\frac{b}{r} \operatorname{tg}(\theta) \right]. \quad (2.13)$$

Используя описанную выше модель среды для разреженного леса и основываясь на операциях булевой алгебры, можно получить следующие выражения для искомых коэффициентов A_G/A и A_C/A :

$$\frac{A_G}{A} = \exp\left(-d\pi r^2 \left[\sec(\theta'_i) + \sec(\theta'_v) - \bar{O}(\theta_i, \theta_v, \phi) \right]\right), \quad (2.14a)$$

$$\frac{A_C}{A} = \frac{1}{2}(1 + \cos(g)) \left(1 - \exp\left[-d\pi r^2 \sec(\theta_v)\right]\right), \quad (2.14b)$$

где g – фазовый угол (уравнение 2.10г); $\bar{O}(\theta_i, \theta_v, \phi)$ – среднее (по распределению высот положения центров сфероидов h) значение функции перекрытия $O(\theta_i, \theta_v, \phi)$ между тенями отдельных кроны (участками подстилающей поверхности, заслоненными кронами для данной геометрии освещения) и «тенями» в направлении наблюдения (участками поверхности, заслоненными кронами для данной геометрии наблюдения):

$$O(\theta_i, \theta_v, \phi) = \frac{1}{2} \left[\sec(\theta'_i) + \sec(\theta'_v) - \frac{h}{b} | \operatorname{tg}(\theta'_i) - \operatorname{tg}(\theta'_v) \cos(\phi) | \right]. \quad (2.15)$$

При увеличении плотности расположения кроны возникает эффект взаимного затенения. В работе (Li, Strahler, 1992) разработаны корректирующие коэффициенты значений параметров A_G/A и A_C/A для общего случая с учетом указанного эффекта.

В качестве практического примера использования моделей КСЯ рассмотрим алгоритм MODIS BRDF/Albedo, разработанный для нормализации коэффициента отражения. В алгоритме применяется линейная модель, основанная на совместном использовании подхода геометрической оптики, описывающего рассеяние фотонов на разреженном растительном покрове, и уравнении переноса, характеризующем процесс переноса фотонов внутри плотной растительной среды. Коэффициент отражения рассчитывается согласно следующему уравнению:

$$R(\theta_i, \theta_v, \phi, \lambda) = f_{iso}(\lambda) + f_{vol}(\lambda) k_{vol}(\theta_i, \theta_v, \lambda) + f_{geo}(\lambda) k_{geo}(\theta_i, \theta_v, \lambda). \quad (2.16)$$

Здесь функции $k_{vol}(\theta_i, \theta_v, \lambda)$ и $k_{geo}(\theta_i, \theta_v, \lambda)$ являются ядрами для *объемного рассеяния* и *поверхностного рассеяния* соответственно, λ – длина волны излучения. Веса $f_{iso}(\lambda)$, $f_{vol}(\lambda)$ и $f_{geo}(\lambda)$ определяются путем аппроксимации на основе доступных измерений ДФСО. Вес $f_{iso}(\lambda)$ соответствует изотропному рассеянию.

Ядро объемного рассеяния описывается моделью *Ross-thick*, полученной путем линеаризации уравнения переноса для растительного покрова (см. раздел 2.3). При линеаризации приняты следующие предположения: 1) использована аппроксимация однократного рассеяния (игнорируется многократное рассеяние); 2) растительный покров представлен средой с полным перемешиванием (*turbid medium*); 3) предполагается однородное распределение (по углам) нормалей листы; 4) предполагается, что коэффициент пропускания листа равен коэффициенту рассеяния листа; 5) напочвенное покрытие считается ламбертовской поверхностью; 6) пред-

полагается высокая плотность листового покрова (описываемая индексом листовой поверхности LAI (раздел 2.3, уравнение 2.20), $LAI \gg 1$), отсюда термин «thick» в названии ядра. Основываясь на этих предположениях, можно представить ядро объёмного рассеяния в следующей линейной форме:

$$k_{vol} = c_1 k_{thick} + c_2, \quad (2.17a)$$

где:

$$c_1 = \frac{4s}{3\pi} (1 - \exp(-LAI \cdot B)), \quad c_2 = \frac{s}{3} + \exp(-LAI \cdot B) \left(\rho_s - \frac{s}{3} \right), \quad (2.17б)$$

$$k_{thick} = \frac{(\pi / 2 - \phi) \cos(g) + \sin(g)}{\cos(\theta_i) + \cos(\theta_v)} - \frac{\pi}{4}. \quad (2.17в)$$

Здесь s – коэффициент отражения листа; ρ_s – коэффициент отражения почвы; B – среднее значение $\sec(\theta)$, принятое равным 1,5; $\cos(g)$ и $\sin(g)$ – косинус и синус угла между направлениями на Солнце и сенсор (фазовый угол, уравнение 2.10г).

Ядро рассеяния на поверхности представлено моделью *Li-thin*, полученной путем линейаризации модели геометрической оптики для моделирования КСЯ растительного покрова. При линейаризации использованы следующие предположения: 1) растительные объекты моделируются сферами, которые бросают тень на ламбертовскую поверхность или другие объекты; 2) предполагается случайное распределение сфер на поверхности; 3) коэффициент отражения определяется пропорцией освещенных и затененных объектов и почвы для данной геометрии наблюдения; 4) сферы распределены разрежено, так что затененной может быть только почва (отсюда термин «thin» в названии ядра). Основываясь на этих предположениях, ядро рассеяния на поверхности можно представить в следующей линейной форме:

$$k_{geo} = c_1 k_{sparse} + c_2, \quad (2.18a)$$

где:

$$c_1 = Cd\pi r^2, \quad c_2 = C. \quad (2.18б)$$

$$k_{sparse} = O(\theta_i, \theta_v, \phi) - \sec(\theta'_i) - \sec(\theta'_v) + \frac{1}{2} [1 + \cos(g') \sec(\theta'_v)], \quad (2.18в)$$

$$O(\theta_i, \theta_v, \phi) = \frac{1}{\pi} [t - \sin(t) \cos(t)] [\sec(\theta'_i) + \sec(\theta'_v)]. \quad (2.18г)$$

Здесь C – коэффициент отражения освещенной поверхности, d – плотность распределения сфер по поверхности, h – высота центра кроны над почвой, r – радиус кроны, θ' – преобразованный зенитный угол (уравнение (2.13)), $\cos(g')$ – косинус фазового угла между направлениями падающего (i') и отраженного (v') излучения после замены переменных (уравнение (2.13)), определенный по урав-

нению (2.10г). Параметр t вычисляется из следующего тригонометрического соотношения:

$$\cos(t) = \frac{h \sqrt{G'^2 + [\operatorname{tg}(\theta'_i) \operatorname{tg}(\theta'_v) \sin(g')]^2}}{r \operatorname{sec}(\theta'_i) + \operatorname{sec}(\theta'_v)}, \quad (2.18д)$$

где функция G' рассчитывается в новых переменных (уравнение (2.13)) согласно уравнению (2.10е).

На основе описанной модели алгоритм MODIS BRDF/Albedo вычисляет параметры для широкополосного (0,3–0,7 мкм, 0,7–5,0 мкм, 0,3–5,0 мкм) и спектрального (1–7 каналы MODIS, <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>) КСЯ. На основе этих параметров пользователь может вычислить КСЯ для заданной геометрии освещения и наблюдения. Также для удобства пользователя предоставляется продукт MODIS NBAR (Nadir BRDF-Adjusted Reflectance) – КСЯ в каналах MODIS, рассчитанный при условии отражения в зенит и положении Солнца в полдень для данной территории. Рассчитываются также следующие продукты: 1) альbedo при освещении мононаправленным солнечным излучением (DHR или black-sky albedo) и 2) альbedo при диффузном освещении (BHR или white-sky albedo). Black-sky albedo вычисляется для локального положения Солнца в зените для данной территории и даты.

При расчете продуктов модельные данные используются только в том случае, когда доступно ≥ 7 чистых наблюдений за 16-дневный период формирования композитного изображения (полная обратимость модели, высокое качество). Если такого количества данных не находится, то вместо модельных данных используется архив типичных угловых профилей КСЯ. Для создания архива классов профилей КСЯ над различными растительными объектами был разработан алгоритм AMBRALS (Algorithm for Model Bidirectional Reflectance Anisotropies of the Land Surfaces) (Wanner et al., 1997). При наличии хотя бы одного чистого измерения можно применить линейное преобразование архивных значений КСЯ, чтобы привести их в соответствие с наблюдаемым значением (обращение модели по величине КСЯ, низкое качество).

Эффект нормализации КСЯ демонстрируется на *рис. 2.11*, где сравниваются суточный КСЯ и композитный продукт NBAR. На суточных данных видны вариации, возникающие из-за зашумления данных облаками и аэрозолями, а также из-за разницы в геометрии наблюдения для соседних орбит. Все эти эффекты корректируются с помощью вычисления параметров модели для коэффициента отражения поверхности (уравнение 2.16) и реконструкции КСЯ на основе этих параметров.

2.3. Уравнение переноса солнечного излучения в растительном покрове

Рассмотрим моделирование взаимодействия солнечного излучения с растительной средой на основе уравнения переноса. Этот подход описывает объемное рассеяние фотонов, в отличие от модели геометрической оптики, описывающей

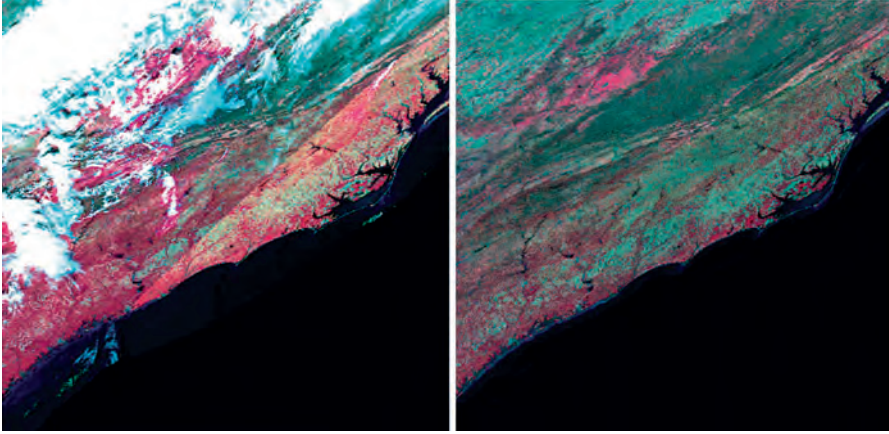


Рис. 2.11. Изображение, полученное прибором MODIS 02.11.2000 (слева) и реконструкция КСЯ на основе алгоритма MODIS BRDF/Albedo (трехканальное композитное изображение NBAR за период 31 октября – 15 ноября 2000 г., справа) для территории штата Сев. Каролина, США; псевдоцвета: R – ближний ИК; G – красный канал; B – зеленый канал (по данным Schaaf et al., 2002)

отражение от поверхности растительного покрова. Формализм теории переноса фотонов в растительном покрове был предложен Ю. Россом (Росс, 1975; Ross, 1981) и его коллегами по Университету г. Тарту (Эстония) на основе более ранних работ по моделированию переноса излучения в атмосфере. Рассмотрим неоднородный растительный покров, состоящий из кластеров фитоэлементов и открытого пространства между ними. Пространственная структура такой среды может быть описана при помощи индикаторной функции, заданной для каждой точки пространства \vec{r} :

$$\chi(\vec{r}) = \begin{cases} 1, & \vec{r} \in \text{фитоэлемент}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (2.19)$$

Индикаторная функция считается случайной величиной. Плотность растительного покрова характеризуется индексом листовой поверхности LAI , определенным как величина отношения суммарной площади односторонней поверхности листьев на участке земной поверхности к площади данного участка $[m^2/m^2]$:

$$LAI = \frac{1}{S} \int_V \chi(\vec{r}) d_L(\vec{r}) d\vec{r}, \quad (2.20)$$

где d_L – объемная плотность площади односторонней листовой поверхности $[m^2/m^3]$, а интегрирование производится по объему V с основанием S (равным единице площади). Для описания взаимодействия солнечного излучения с фитоэлементами используются функции, определенные ниже.

G -функция – средняя величина проекции нормали листа на направление $\vec{\Omega}$ в верхней полусфере:

$$G(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi^+} g_L(\vec{r}, \vec{\Omega}_L) \left| \vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}_L \right| d\vec{\Omega}_L. \quad (2.21)$$

Индикатриса рассеяния элементарного объема, Γ – плотность вероятности рассеяния падающего из направления $\vec{\Omega}'$ фотона в направлении $\vec{\Omega}$:

$$\frac{1}{\pi} \Gamma(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi^+} g_L(\vec{r}, \vec{\Omega}_L) \left| \vec{\Omega}' \cdot \vec{\Omega}_L \right| \gamma_{L,\lambda}(\vec{\Omega}_L, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}_L. \quad (2.22)$$

Здесь $g_L(\vec{r}, \vec{\Omega}_L)$ – плотность вероятности распределения листовых нормалей $\vec{\Omega}_L$ в верхней полусфере. Различают следующие распределения:

- Равномерная ориентация – вероятность распределения не зависит от угла наклона.
- Горизонтальные листья – расположение листьев исключительно горизонтальное.
- Вертикальные листья – расположение листьев исключительно вертикальное.
- Планофильное – расположение листьев преимущественно горизонтальное.
- Эректофильное – расположение листьев преимущественно вертикальное.
- Плагиофильное – наклонное расположение преимущественно под углом 45° .
- Экстремофильное – двуимодальное распределение с максимумами в 0° и 90° .

Индикатриса рассеяния листа $\gamma_{L,\lambda}$ – это плотность вероятности рассеяния падающего фотона с длиной волны λ из направления $\vec{\Omega}'$ в направлении $\vec{\Omega}$ при условии, что нормаль листа расположена в направлении $\vec{\Omega}_L$, определенная следующим образом (Shultis, Myneni, 1988):

$$\gamma_{L,\lambda}(\vec{\Omega}_L, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) = \begin{cases} \frac{1}{\pi} r_D(\lambda) \left| \vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}_L \right|, & (\vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}_L)(\vec{\Omega}' \cdot \vec{\Omega}_L) < 0, \\ \frac{1}{\pi} t_D(\lambda) \left| \vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}_L \right|, & (\vec{\Omega} \cdot \vec{\Omega}_L)(\vec{\Omega}' \cdot \vec{\Omega}_L) > 0. \end{cases} \quad (2.23)$$

Здесь $r_D(\lambda)$ и $t_D(\lambda)$ – спектральные коэффициенты отражения и пропускания растительного элемента на длине волны λ . Интегрируя индикатрису рассеяния листа по всем направлениям сферы, получаем альбедо однократного рассеяния листа:

$$\int_{4\pi} \gamma_{L,\lambda}(\vec{\Omega}_L, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} = r_D(\lambda) + t_D(\lambda) \equiv \omega(\lambda). \quad (2.24)$$

Спектр коэффициентов отражения и пропускания листа, рассчитанный на основе модели PROSPECT (Jacquemoud, Varet, 1990), показан на *рис. 2.12*. В этой модели мезофил (внутренняя часть) листа представлен как система слоев пигмента, разделенных прослойками смеси воды и воздуха. Рассеяние света характеризуется коэффициентом преломления (зависящим от длины волны) и количеством ячеек в мезофиле (M). Пропускание/поглощение света определяется концентрацией пигментов хлорофилла а и b (C_{a+b}) и содержанием воды (C_w). Отличительной особенностью спектра листа является сильное поглощение излучения в красной и синей областях видимого диапазона, частично замещаемое рассеянием в зеленой области. В ИК диапазоне преобладает рассеяние излучения.

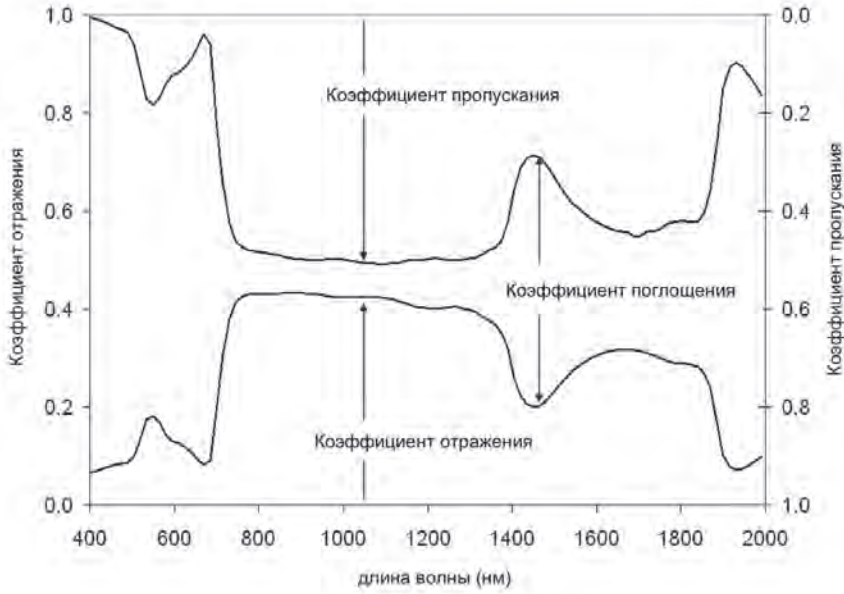


Рис. 2.12. Спектральная зависимость коэффициентов отражения, поглощения и пропускания листа, рассчитанных по модели PROSPECT (Jacquetoud, Baret, 1990)

Используя данные выше определения, можно компактно представить коэффициент ослабления σ и дифференциальный коэффициент рассеяния σ_s (Ross, 1981):

$$\sigma(\vec{r}, \vec{\Omega}) \equiv d_L(\vec{r}) G(\vec{r}, \vec{\Omega}), \quad (2.25)$$

$$\sigma_s(r, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \equiv \frac{d_L(\vec{r})}{\pi} \Gamma(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}). \quad (2.26)$$

Комбинируя уравнения для σ и σ_s , получим следующее выражение для альбедо однократного рассеяния:

$$\frac{\int_{4\pi} \sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) d\vec{\Omega}}{\sigma(\vec{\Omega})} = \omega(\vec{\Omega}'). \quad (2.27)$$

Перенос излучения в растительной среде описывается 3D уравнением, определенным для интенсивности солнечного излучения $I(\vec{r}, \vec{\Omega})$ в точке \vec{r} и направлении $\vec{\Omega}$ (Князихин, Маршак, 1992):

$$\vec{\Omega} \cdot \nabla I(\vec{r}, \vec{\Omega}) + \chi(\vec{r}) \sigma(\vec{\Omega}) I(\vec{r}, \vec{\Omega}) = \chi(\vec{r}) \int_{4\pi} \sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) I(\vec{r}, \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}'. \quad (2.28)$$

По физическому смыслу уравнение переноса представляет собой закон сохранения энергии – в каждой точке приходящая энергия (первый член слева) тра-

тится на поглощение (второй член слева) и рассеяние (член справа). Для получения единственного решения уравнения переноса задаются следующие краевые условия:

$$\begin{cases} I(z=0, \vec{\Omega}) = \frac{f_{dir}}{|\mu(\vec{\Omega}_0)|} \delta(\vec{\Omega} - \vec{\Omega}_0) + [1 - f_{dir}] d(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}_0), & \mu(\vec{\Omega}) < 0, \\ I(z=H, \vec{\Omega}) = \frac{\rho_{soil}}{\pi} \int_{2\pi^-} I(z=H, \vec{\Omega}') |\mu(\vec{\Omega}')| d\vec{\Omega}', & \mu(\vec{\Omega}) > 0, \end{cases} \quad (2.29)$$

где первое уравнение определяет входной поток солнечного излучения, его прямую $\delta(\vec{\Omega} - \vec{\Omega}_0)$ и диффузную $d(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}_0)$ составляющие на верхней границе растительного покрова ($z = 0$); f_{dir} (0–1) обозначает отношение прямой компоненты к полному потоку солнечного излучения; $\vec{\Omega}_0$ – направление распространения прямого солнечного излучения; $\mu(\vec{\Omega})$ – косинус зенитного угла, определяющего направление распространения излучения $\vec{\Omega}$. Второе уравнение определяет краевые условия внизу растительного покрова, на уровне почвы ($z = H$), которая считается ламбертовской поверхностью с коэффициентом отражения ρ_{soil} .

Для удобства решения полного уравнения переноса (уравнения 2.28, 2.29), выделяют две подзадачи с упрощенными краевыми условиями. Для первой подзадачи, называемой «черная почва» (black soil, *BS*-problem), на верхней границе растительного покрова оставляют оригинальные краевые условия, а на нижней коэффициент отражения почвы ρ_{soil} устанавливают равным нулю. Для второй подзадачи, называемой «почва» (soil, *S*-problem), на верхней границе устанавливают нулевые значения интенсивности излучения, а на нижней границе условия соответствуют ламбертовским (изотропным) источникам излучения. Сборка решения полного уравнения переноса осуществляется следующим образом:

$$I(\vec{r}, \vec{\Omega}) \approx I_{BS}(\vec{r}, \vec{\Omega}) \frac{\rho_{soil}}{1 - \rho_{soil} R_S} T_{BS} I_S(\vec{r}, \vec{\Omega}), \quad (2.30a)$$

$$R \approx R_{BS} + \frac{\rho_{soil}}{1 - \rho_{soil} R_S} T_{BS} T_S, \quad (2.30б)$$

$$A \approx A_{BS} + \frac{\rho_{soil}}{1 - \rho_{soil} R_S} T_{BS} A_S, \quad (2.30в)$$

$$T \approx T_{BS} + \frac{\rho_{soil}}{1 - \rho_{soil} R_S} T_{BS} R_S, \quad (2.30г)$$

где I , I_{BS} , I_S обозначают интенсивности излучения; R , R_{BS} , R_S – альбедо; A , A_{BS} , A_S – коэффициенты поглощения; T , T_{BS} , T_S – коэффициенты пропускания растительного покрова для полной, *BS*- и *S*-задач соответственно. Эти переменные удовлетворяют закону сохранения энергии:

$$R + A + (1 - \rho_{soil})T = I, \quad (2.31a)$$

$$R_k + A_k + T_k = I, \quad (2.316)$$

где уравнение (2.31a) относится к полной задаче, а уравнение (2.316) – к подзадачам ($k = BS$ или S).

Решение уравнения переноса, т.е. вычисление интенсивности излучения в каждой точке среды по заданным параметрам растительного покрова, называется *прямой задачей*. При заданных граничных условиях задача имеет единственное решение. Существует и *обратная задача* – вычисление заданного параметра растительной среды на основе известной величины интенсивности излучения. Пример решения обратной задачи – вычисление *LAI* – будет рассмотрен в разделе 2.4. В данном разделе рассматривается только прямая задача. Основные способы решения уравнения переноса представлены следующими направлениями:

- Численное моделирование методом Монте-Карло (Ray-tracing) рассеяния фотонов в растительной среде. В этом методе формулируется 3D модель архитектуры растительного покрова и рассчитывается траектория потока фотонов в соответствии с уравнением переноса. Пример – модель Raytran (Govaerts, Verstraete, 1998).
- Решение 3D уравнения переноса методом дискретных ординат. Пример – модель DISORT (Discrete Ordinates) (Myneni, Asrar, 1993).
- Формулировка стохастического 1D уравнения переноса и его решение методом простых итераций (на каждой итерации описывается одно столкновение фотона с веществом среды; аппроксимируется интенсивность излучения, сформированного в результате всех произошедших столкновений) (Successive Orders of Scattering Approximation, SOSA). В этом подходе 3D уравнение переноса усредняется по горизонтальной плоскости и параметризуется моментами пространственной корреляции 3D структуры растительности. Пример – модель SRT (Stochastic Radiative Transfer) (Shabanov et al., 2000, 2007; Huang et al., 2008).
- Формулировка 1D уравнения переноса для среды с полным перемешиванием и его решение посредством метода простых итераций. Пример – TWOVEG модель (Shultis, Myneni, 1988).
- Формулировка уравнения переноса для потоков излучения. Версия для четырех потоков (диффузные потоки вверх и вниз, мононаправленный падающий и мононаправленный в сторону наблюдателя) была разработана в модели SAIL (Scattering by Arbitrary Inclined Leafs) (Verhoef, 1984). Двухпоточковая версия (потоки диффузного излучения вверх и вниз) была разработана в модели two-stream approximation (Meador, Weaver, 1980; Sellers, 1985). В обоих случаях были выведены аналитические решения для ограниченного количества специальных случаев структуры растительного покрова.

Интернет-ресурс RAMI (Radiative Transfer Model Intercomparison) был создан для тестирования моделей, основанных на уравнении переноса излучения в растительном покрове (Pinty et al., 2004; <http://rami-benchmark.jrc.ec.europa.eu/HTML/Home.php>).

Для обработки спутниковых данных с целью расчета объемных биофизических характеристик среды (таких как *LAI*) наиболее целесообразным является

использование стохастического уравнения переноса. 3D уравнение переноса требует детального моделирования растительной среды, что практически нереализуемо на континентальном и глобальном масштабах. С другой стороны, 1D уравнение переноса не учитывает эффекты влияния оптической неоднородности трехмерной растительной среды на поле излучения, а они могут привести к значительным погрешностям решения. Оптимальным решением задачи является использование уравнения для интенсивности излучения, усредненной по площади пикселя, что напрямую соответствует измеряемой спутниковым сенсором величине. Усреднение должно быть произведено таким способом, чтобы не потерять структурную информацию, но ограничить уровень детализации задачи (количество входных параметров и масштаб пространственной вариабельности решения в горизонтальной плоскости). Такое усредненное уравнение было сформулировано для разорванной облачности (Вайникко, 1973а, 1973б); особенности решения были исследованы (Titov, 1990; Зуев, Титов, 1996). Позднее этот подход был применен для растительного покрова (Shabanov et al., 2000).

Стохастическое уравнение переноса формулируется для двух типов средней интенсивности излучения: 1) $\bar{I}(z, \vec{\Omega})$ – интенсивность, усредненная по всему пространству горизонтальной плоскости на высоте z ; 2) $U(z, \vec{\Omega})$ – интенсивность, усредненная по части плоскости z , занятой растительными элементами:

$$\bar{I}(z, \vec{\Omega}) = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{1}{S_R} \iint_{S_R} I(x, y, z, \vec{\Omega}) dx dy, \quad (2.32a)$$

$$U(z, \vec{\Omega}) = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{1}{S_R \cap T_z} \iint_{S_R \cap T_z} I(x, y, z, \vec{\Omega}) dx dy, \quad (2.32b)$$

где S_R обозначает круг радиуса R ; T_z – часть горизонтальной плоскости на высоте z , занятая фитоэлементами. После усреднения 3D уравнения переноса получается система интегральных уравнений Вольтера второго рода, которые решаются численными методами, в частности, методом простых итераций (Shabanov et al., 2000). Процедура усреднения приводит к параметризации полученного уравнения переноса в терминах двух стохастических моментов структуры растительного покрова (рис. 2.13).

Первый момент – это вероятность $p(z)$ наличия фитоэлемента на плоскости z :

$$p(z) = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{S_R \cap T_z}{S_R}. \quad (2.33)$$

Второй момент – это парная корреляционная функция, $q(z_1, z_2, \vec{\Omega})$, между фитоэлементами, находящимися на плоскостях z_1 и z_2 по направлению $\vec{\Omega} = (\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ относительно друг друга:

$$q(z_1, z_2, \vec{\Omega}) = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{S_R \cap T_{z_1} \cap T_{z_2} \left[\frac{\Omega_x}{\Omega_z}(z_1 - z_2), \frac{\Omega_y}{\Omega_z}(z_1 - z_2) \right]}{S_R}, \quad (2.34)$$

где аргумент функции T_{z_2} означает сдвиг начала координат плоскости z_2 относительно плоскости z_1 по направлению $\vec{\Omega}$ (рис. 2.13).

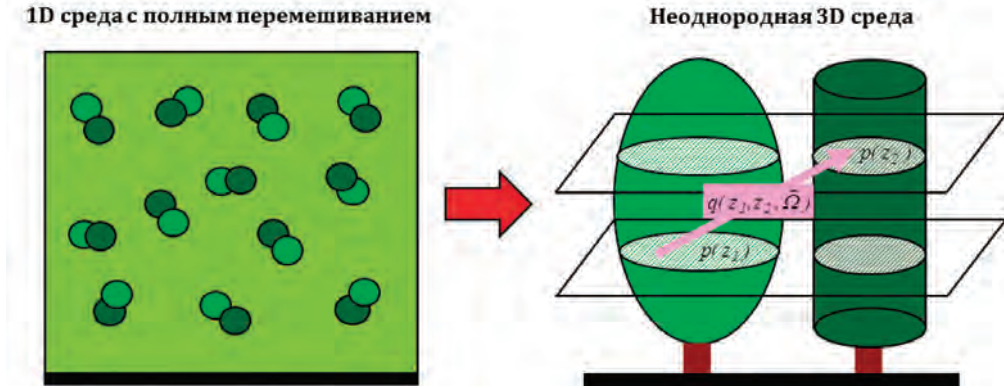


Рис. 2.13. Моделирование структуры растительного покрова – от 1D среды с полным перемешиванием до реалистичной 3D архитектуры (учитывающей форму крон деревьев и их взаимное расположение). В стохастическом уравнении структура среды учитывается посредством задания вероятности нахождения фитоземента на плоскости $p(z)$ и парной корреляционной функции между двумя элементами $q(z_1, z_2, \vec{\Omega})$

Несколько аналитических моделей функции q было разработано, используя принципы стохастической геометрии (Stoyan et al, 1995). В частности, при моделировании растительности вертикальными цилиндрами радиуса a , распределенными в соответствии со стационарным процессом Пуассона, парная корреляционная функция имеет следующее аналитическое выражение (Huang et al., 2008):

$$q(\Delta) = 2p - 1 + (1 - p)^{2 - \Xi(\Delta)/\pi a^2}, \quad (2.35a)$$

где:

$$\Delta = |(z_1 - z_2) \operatorname{tg}(\theta)|, \quad (2.35b)$$

$$\Xi(\Delta) = 2a^2 \left[\arccos\left(\frac{\Delta}{2a}\right) - \frac{\Delta}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta}{2a}\right)^2} \right] \Theta(2a - \Delta), \quad (2.35b)$$

θ – зенитный угол, определяющий направление $\vec{\Omega}$ и $\Theta(\dots)$ – пороговая функция Хевисайда. Условная парная корреляционная функция $q/p \equiv K(\Delta/2a)$ представлена на рис. 2.14.

Основными ее особенностями являются: 1) функция принимает максимальное значение (равное 1) при расстоянии близком к 0, что соответствует ситуации, когда фитоземента коррелируют сами с собой; 2) с увеличением расстояния до $2a$ корреляция плавно ослабевает и доходит до стационарного значения равного p на больших расстояниях, что соответствует корреляции независимых фитоземента.

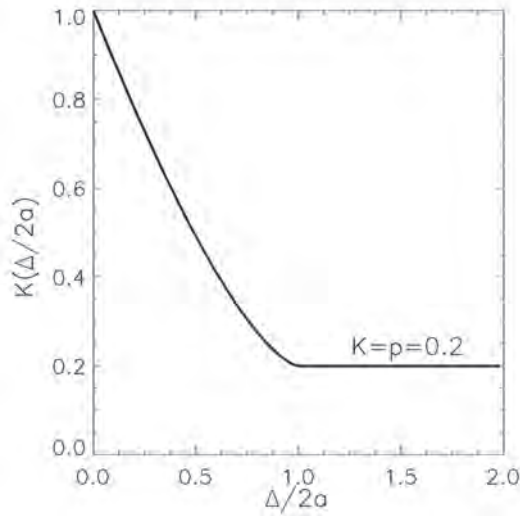


Рис. 2.14. Парная корреляционная функция для растительного покрова, представленного цилиндрами радиуса a , распределенными на поверхности почвы в соответствии со стационарным процессом Пуассона. В этом примере $a = 0,7$, $p = 0,2$

Из стохастического уравнения переноса следуют некоторые аналитические соотношения, характеризующие 3D эффекты поля излучения в неоднородной среде. В то время как выражения для альбедо и коэффициента пропускания получают с использованием средней интенсивности излучения по всей плоскости (I), коэффициент поглощения рассчитывается с использованием средней интенсивности по фитоэлементам (U), т.к. только они способны поглощать солнечное излучение:

$$R_{BS}(\lambda) = \int_{2\pi^+} \bar{I}_d(\theta, \vec{\Omega}) |\mu(\vec{\Omega})| d\vec{\Omega}, \quad (2.36a)$$

$$T_{BS}(\lambda) = \int_{2\pi^-} \bar{I}_d(H, \vec{\Omega}) |\mu(\vec{\Omega})| d\vec{\Omega} + f_{dir}(\lambda, \vec{\Omega}_0) \bar{I}_\delta(H), \quad (2.36b)$$

$$A_{BS}(\lambda) = (1 - \omega(\lambda)) \left\{ \int_0^H d\xi \int_{4\pi} p(\xi) \sigma(\vec{\Omega}) U_d(\xi, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} + \frac{f_{dir}(\lambda, \vec{\Omega}_0) \sigma(\vec{\Omega}_0)}{|\mu(\vec{\Omega}_0)|} \int_0^H p(\xi) U_\delta(\xi) d\xi \right\}, \quad (2.36b)$$

где символы δ и d относятся к направленной и диффузной составляющей излучения соответственно, ω – альбедо однократного рассеяния. Далее, учитывая тот факт, что в каждой точке пространства может находиться либо фитоэлемент, либо открытое пространство (gap):

$$p(z) + p^{gap}(z) = I, \quad (2.37)$$

из процедуры усреднения следует, что

$$\bar{I}(z, \vec{\Omega}) = p^{(gap)}(z)U^{(gap)}(z, \vec{\Omega}) + p(z)U(z, \vec{\Omega}). \quad (2.38)$$

Решив стохастическое уравнение переноса для неоднородной растительной среды, мы получаем функции I и U , а затем, используя выражение 2.38, можно вычислить функцию $U^{(gap)}$ – интенсивность излучения в открытом пространстве. За исключением среды с полным перемешиванием интенсивность излучения в открытом пространстве будет иной, чем внутри фитоэлемента, т.к. среды имеют различные оптические свойства. Данный эффект не учитывается в современных способах по радиометрическому наземному измерению LAI (например, прибор LAI-2000), поскольку технология основана на приближении среды с полным перемешиванием (Shabanov et al., 2003). Следуя принципу разложения интенсивности излучения на компоненты, была предложена расширенная формулировка стохастической модели – вместо системы «растительность + открытое пространство» использовать систему «набор классов растительности + открытое пространство» (Shabanov et al., 2007).

Рассмотрим еще несколько примеров, основанных на результатах численного моделирования, которые иллюстрируют возможности (и ограничения) стохастического уравнения переноса по воспроизведению влияния 3D эффектов. Заметим, что поверхностный эффект обратного блеска не воспроизводится стохастической моделью на основе только физических законов. Как и в случае 1D уравнения переноса, используется поправочный множитель для коэффициента поглощения σ с целью моделирования этого эффекта (Shabanov et al., 2000). Далее рассмотрим 3D эффект пропускания мононаправленного излучения сквозь открытое пространство между деревьями, в результате чего на почве ярко освещённые участки чередуются с тенями (рис. 2.15а). Такой эффект невозможно описать моделью для однородной среды, в то время как стохастическая модель способна воспроизвести этот эффект.

Результаты численного моделирования для случая с полным перемешиванием и стохастической модели приведены на рис. 2.15б. Альbedo, коэффициенты поглощения и пропускания показаны как функция LAI для потока солнечного излучения, падающего под углами 0° и 60° . Заметим, что модельные результаты достаточно близки при 60° и сильно различаются для 0° . Физически это объясняется тем, что при больших зенитных углах освещения влияние структуры растительного покрова ослабляется – не остается открытых пространств для прохождения солнечного потока, в отличие от ситуации, когда Солнце находится в зените. Математически этот эффект выражается в том, что аргумент Δ в уравнении (2.35) стремится к нулю при больших зенитных углах Солнца, а парная корреляционная функция приближается к просто вероятности p нахождения фитоэлементов, что соответствует случаю с полным перемешиванием.

Сравним коэффициент пропускания для падающего излучения на основе двух моделей при зенитном угле освещения, равном 0° : в случае модели с полным перемешиванием он стремится к нулю, а в случае стохастической модели выхо-



Рис. 2.15а. Прямое пропускание солнечных лучей сквозь открытое пространство между кронами. На фото на уровне напочвенного покрова участки с затенением чередуются с участками, освещенными прямым солнечным излучением. Стохастическое уравнение учитывает этот эффект, в отличие от 1D уравнения для однородной среды

дит на уровень, равный вероятности наличия открытого пространства. Интересен также результат сравнения зависимости альбедо от LAI для двух моделей. В случае модели с полным перемешиванием альбедо выходит на насыщение (не меняется в зависимости от LAI при $LAI > 3$), в то время как в случае стохастической модели (небольшая) зависимость сохраняется (чем ближе зенитный угол Солнца к 0° , тем более выражена зависимость). Важен также результат для коэффициента поглощения – стохастическая модель предсказывает значительно меньшее поглощение, что влияет на оценку таких базовых биофизических параметров как FPAR (Fraction of Photosynthetically Active Radiation) – поглощенная растительностью и используемая для фотосинтеза часть энергии излучения в спектральном диапазоне 0,4–0,8 мкм.

Заметим, что приведенные выше численные результаты для коэффициентов поглощения и пропускания в красном канале соответствуют аналитическим выражениям для распространения прямого солнечного излучения. Полученные ниже выражения выведены для функции $U_\delta(z)$ при условии, что зенитный угол Солнца равен 0° :

Одномерная модель для среды с полным перемешиванием ($K = p$):

$$T(z) = \exp(-p \sigma z), \quad A = 1 - \exp(-p \sigma H), \quad (2.39)$$

Стохастическая модель для среды со структурой при ($K=1$):

$$T(z) = 1 - p [1 - \exp(-\sigma z)], \quad A = p [1 - \exp(-\sigma H)]. \quad (2.40)$$

Рассмотрим влияние структуры растительной среды на соотношение LAI и вегетационного индекса $NDVI$ (рис. 2.16). Эта взаимосвязь используется во многих алгоритмах для оценки LAI , при этом одна из фундаментальных проблем такого подхода состоит в том, что соотношение выходит на уровень насыщения для боль-

ших LAI ($LAI > 3$), если используется модель для однородной среды. Как видно из рис. 2.16, эффект насыщения ослаблен для стохастической модели. Этот результат для $NDVI$ следует из ослабления насыщения значений коэффициента отражения в спектральных каналах (рис. 2.15б).

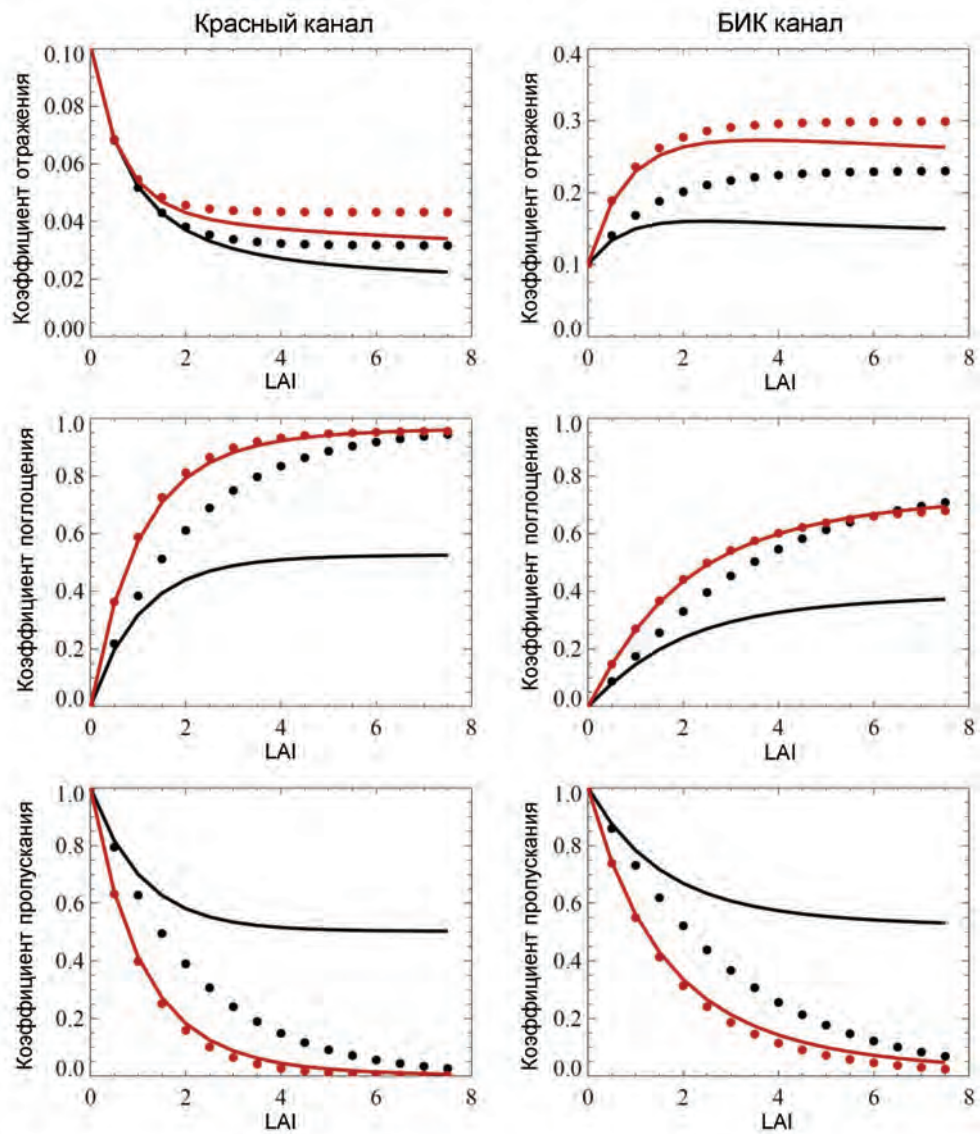


Рис. 2.15б. Количественная оценка влияния оптической неоднородности 3D растительной среды на поле излучения на основе стохастической модели (сплошная линия) и модели с полным перемешиванием (точки) для зенитного угла Солнца 60° (красным) и 0° (черным). В случае стохастической модели не происходит насыщения альбедо, поглощение и пропускание ограничивается. Параметры модели: $p = 0,5$, $d_L = [0,0;0,16]$, $\omega(\text{Красный}) = 0,15$, $\omega(\text{БИК}) = 0,75$, $\rho(\text{Красный}) = \rho(\text{БИК}) = 0,1$

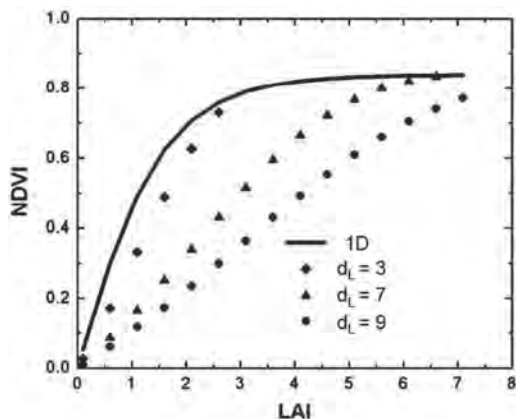


Рис. 2.16. Количественная оценка влияния оптической неоднородности 3D растительной среды на соотношение $NDVI-LAI$. При учете структуры среды функциональная зависимость более плавно выходит на насыщение. Параметры модели: $p = LAI/LAI_{max}$ ($LAI_{max}=7$), $\rho_{soil}(\text{Красный}) = \rho_{soil}(\text{БИК}) = 0,18$ (по данным Huang et al., 2008)

2.4. Обратная задача уравнения переноса для вычисления индекса листовой поверхности

Индекс листовой поверхности LAI (Leaf Area Index) определяется как величина отношения суммарной площади односторонней поверхности листьев на участке земной поверхности к площади данного участка [m^2/m^2]. LAI является ключевым параметром, контролирующим потоки энергии и вещества (водяной пар и углекислый газ) между наземными экосистемами и атмосферой. LAI используется во множестве моделей продуктивности экосистем, глобальных моделях климата, гидрологии, биогеохимии и экологии.

Первые глобальные карты LAI были построены в 1994 году на основе набора данных FASIR (Fourier Adjusted, Solar zenith angle corrected, Interpolated and Reconstructed) (Sellers et al., 1994). Этот набор включает месячные композитные изображения пространственного разрешения $1^\circ \times 1^\circ$, полученные на основе данных NOAA AVHRR. Первый алгоритм вычисления LAI был эвристическим. Позднее был создан архив LAI на основе данных AVHRR (с таким же пространственным и временным разрешением) с использованием физической модели (3D уравнения переноса) и эмпирически подобранных параметров (Myneni et al., 1997). В силу ряда причин потенциал как данных ДЗЗ, так и модели не был использован в полной мере и LAI вычислялся на основе соотношений $LAI-NDVI$, индивидуально построенных для различных классов растительности. Следующий этап развития связан с запуском сенсора MODIS на платформах Terra и Aqua в начале 2000-х гг. На основе данных MODIS был создан ряд глобальных продуктов, предоставляющих информацию о биофизических характеристиках растительного покрова, включая LAI (рис. 2.17). Алгоритм для вычисления LAI был основан на использовании данных спутниковых

измерений КСЯ в спектральных каналах прибора (после атмосферной коррекции) и результатов моделирования КСЯ на основе уравнения переноса для растительного покрова (Knjazikhin et al., 1998).

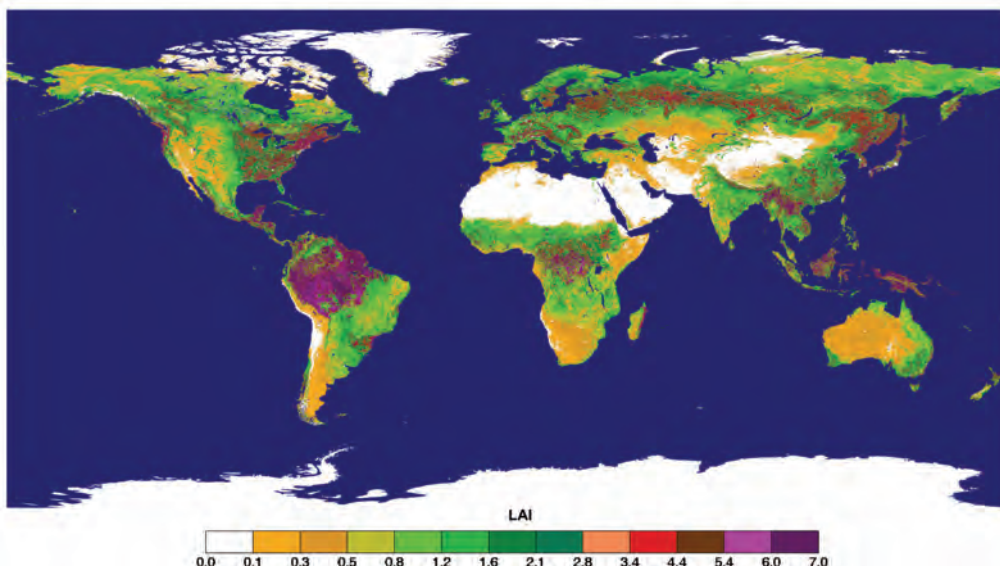


Рис. 2.17. LAI по данным Aqua/MODIS (версия 5), 8-дневный композит для 20–27 августа 2016 г., географическая проекция

Как уже упоминалось ранее (раздел 2.3), *прямая задача* для уравнения переноса состоит в том, чтобы, задав набор параметров растительного покрова, смоделировать процесс рассеяния входного потока фотонов и рассчитать интенсивность излучения в среде.

Алгоритм MODIS LAI решает *обратную задачу* для уравнения переноса — для заданного КСЯ в спектральных каналах вычислить заданный параметр растительного покрова. Такая задача является некорректно поставленной (не имеет единственного решения). Кроме того, входные данные (измерения КСЯ) заданы с погрешностью ввиду ограниченной точности атмосферной коррекции. Для регуляризации решения используются вспомогательные данные, и решение задачи представляется в виде среднего от набора полученных значений (статистическая формулировка).

Алгоритм производит вычисления в два последовательных этапа: 1) расчет суточных данных; 2) расчет композитных изображений. Входными данными для построения суточных LAI являются значения КСЯ в красном и ближнем ИК каналах MODIS, информация о геометрии освещения и наблюдения и карта растительного покрова. На выходе формируется суточный продукт, содержащий в каждом пикселе среднее значение LAI, его стандартное отклонение и набор параметров, характеризующих качество полученных оценок. Данные, содержащиеся в полученном продукте, могут быть сильно зашумлены из-за (порой существенного) облач-

ного покрова, а также ввиду ограниченной точности атмосферной коррекции (раздел 2.1). Построение композитных изображений минимизирует эффект вышеупомянутых факторов. Входными данными для алгоритма построения композитов LAI является набор суточных продуктов LAI за заданный период (8 дней в случае стандартного продукта MODIS). С использованием выбранной схемы (максимум LAI из данных наилучшего качества) выбирается оптимальное измерение LAI , включаемое в выходной файл. Далее мы подробнее остановимся на расчете суточных LAI . Используя стохастическую модель, набор модельных КСЯ вычисляются индивидуально для заданных растительных классов. Классы включают травы, кустарники, с/х растения, саванну, вечнозеленые и листопадные широколиственные леса, а также вечнозеленые и листопадные хвойные леса. Каждый класс характеризуется своим набором параметров уравнения переноса (альбеда листа, архитектура растительного покрова, LAI , набор значений КСЯ в спектральных каналах для различных типов почв, геометрия Солнца/сенсора). Набор решений уравнения переноса хранится в опорных таблицах (LUT). В ходе исполнения алгоритма значения КСЯ в красном и ближнем ИК каналах по данным MODIS сравниваются с соответствующими модельными данными для заданных направлений сенсора $\bar{\Omega}$, Солнца $\bar{\Omega}_0$, класса растительности LC и LAI в пределах допустимого уровня невязки $\delta(\lambda)$, которая зависит от канала λ :

$$\frac{1}{N_\lambda} \sum_\lambda \left| \frac{КСЯ^{MODIS}(\lambda, \bar{\Omega}, \bar{\Omega}_0) - КСЯ^{model}(\lambda, \bar{\Omega}, \bar{\Omega}_0, LC, LAI, soil)}{\delta(\lambda)} \right|^2 < 1. \quad (2.41)$$

Здесь суммирование ведется по числу выбранных каналов N_λ . Для всех решений, удовлетворяющих данному неравенству, выбираются соответствующие значения LAI и вычисляется их среднее, представляющее собой решение обратной задачи. Ввиду различия в степени влияния атмосферы на спектральные данные невязка δ в уравнении (2.41) зависит от спектрального канала: в случае данных MODIS выбрано 20% для красного и 10% для ближнего ИК каналов.

Физические принципы вычисления LAI на основе уравнения переноса визуализированы на *рис. 2.18* (слева). КСЯ почвы представлен прямой линией в пространстве измерений КСЯ в красном и ближнем ИК диапазонах (линия почв) (Baret et al., 1993). Диапазон допустимых КСЯ почвы для данного типа растительности определяется опорными таблицами. При добавлении растительности (увеличении LAI) отражательная способность системы «почва – растительность» изменяется в указанном пространстве измерений и стремится к общему пределу (точке сходимости), не зависящему от КСЯ почвы. Этот эффект означает *насыщение* – ослабление чувствительности КСЯ к изменениям LAI . Линии в рассматриваемом пространстве измерений, по которым изменяется КСЯ системы при фиксированном значении КСЯ почвы, называются изолиниями почвы. На *рис. 2.18* также показаны данные MODIS, обработанные алгоритмом LAI : красным отмечены данные, для которых рассчитанное значение LAI оказывается ниже уровня насыщения (< 4) и зеленым при наличии насыщения (> 4 и < 7).

Желтый цвет соответствует случаю, для которого не было найдено решений (модель не описывает вариабельности данных, либо данные зашумлены атмосфе-

рой – облака, аэрозоли, водяной пар и т.п.). Если основанный на уравнении переноса алгоритм (основной алгоритм) не находит решения, то используется запасной эмпирический алгоритм, основанный на соотношении $LAI-NDVI$ (рис. 2.18, справа). Этот график также иллюстрирует проблему насыщения соотношения $LAI-NDVI$ при высоких LAI . В целом, как видно из рис. 2.18, LAI можно вычислить для любой комбинации значений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах, при условии что $КСЯ(БИК) > КСЯ(красный)$. Физически обоснованными являются (в основном) только те значения LAI , которые получены основным алгоритмом. Данные, обработанные запасным алгоритмом, как правило, зашумлены атмосферой, и оценка LAI не является надежной. В частности, $NDVI$ имеет низкое значение как для разреженной (низкое LAI), так и для плотной (высокое LAI) растительности, покрытой остаточной облачностью.

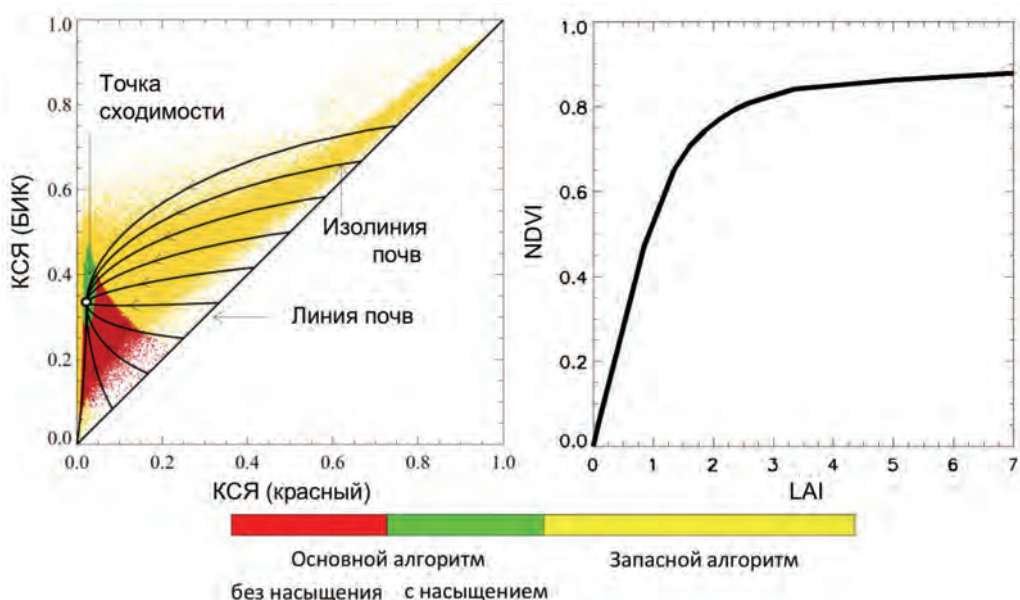


Рис. 2.18. Вычисление LAI основным (слева) и запасным (справа) алгоритмом

Рассмотрим остаточное влияние атмосферы на оценку LAI . Данные КСЯ доступны с двух сенсоров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua. Разница в прохождении спутниками экватора составляет 3 часа, что сказывается на различии в геометрии освещения и наблюдения. Тем не менее пара независимо вычисленных LAI с использованием одного алгоритма предоставляет возможность оценить точность входных данных измерений КСЯ. На рис. 2.19а изображен сезонный профиль LAI , вычисленный независимо на основе данных Terra и Aqua над метеорологической станцией Harvard Forest (см. раздел 2.1). Для двух композитных изображений, полученных по данным Aqua за 9–16 июня и 12–19 августа 2004 года, наблюдается существенное отклонение от сезонного профиля значений LAI .

Из рис. 2.19б, в видно заметное различие значений КСЯ, измеренных по данным Aqua и Terra, приводящее к существенному занижению *NDVI* и, как следствие, занижению значений *LAI*.

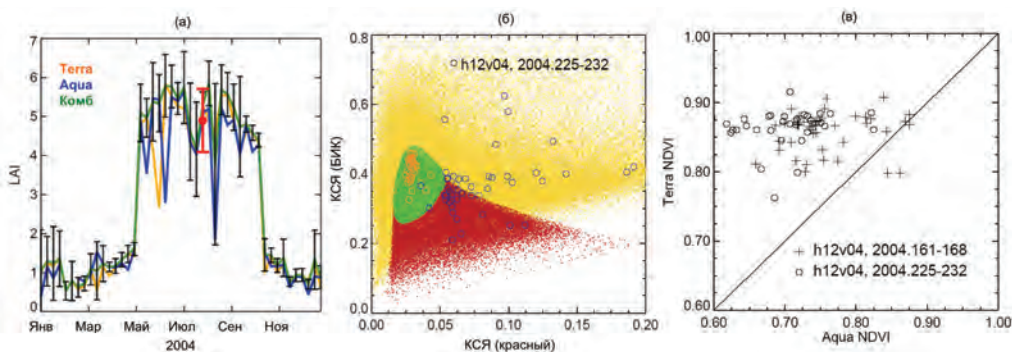


Рис. 2.19. Сравнение сезонных кривых *LAI* (а), значений *КСЯ* (б) и *NDVI* (в) по данным Terra (оранжевым), Aqua (синим) и их комбинирования (зеленым) для станции Harvard forest (42,5328° с.ш., 72,1885° в.д.), штат Массачусетс, США; также показаны наземные измерения (красным) (по данным Yang et al., 2006)

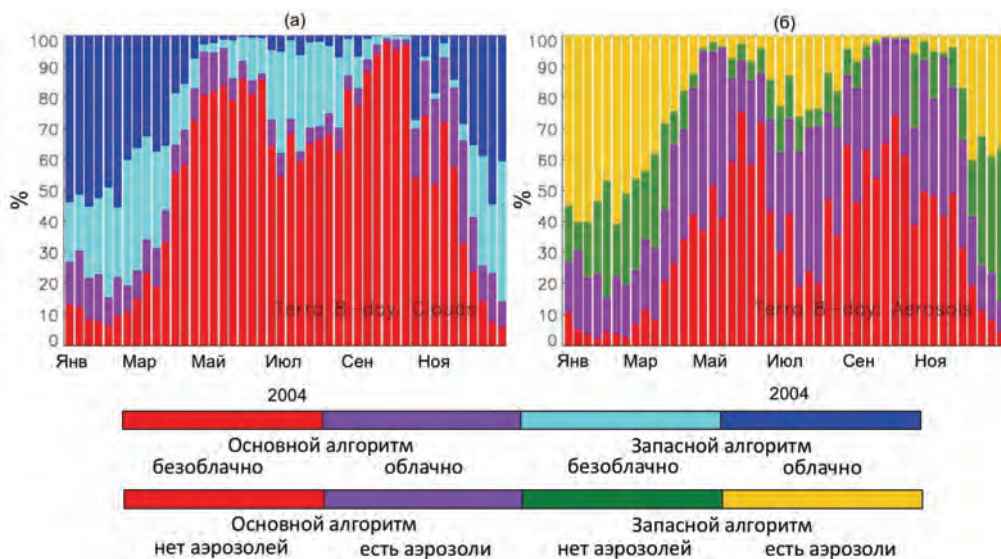


Рис. 2.20. Влияние остаточной облачности (а) и аэрозолей (б) на выбор типа алгоритма *LAI* (основной или запасной) (по данным Yang et al., 2006)

Для выяснения причин погрешностей оценки *КСЯ* были проанализированы индикаторы наличия облачности и аэрозолей, входящие в состав индикатора качества (Quality Control, QC) продукта MODIS *LAI*. Сезонные профили четырех возможных вариантов обработки данных MODIS (с использованием основного/запасного алгоритма при наличии/отсутствии облаков или аэрозолей) представлены на рис. 2.20. Как видно, минимальное количество пикселей обрабатывается основным

алгоритмом при наличии облаков. В то же время категория «основной алгоритм при наличии аэрозолей» начинает преобладать в летнее время, т.к. объём данных с наличием аэрозолей увеличивается в этот период. В частности, аномальные значения *LAI* по данным Aqua были получены при отсутствии облаков, но при наличии аэрозолей. Данный пример показывает, что хотя влияние аэрозолей на значения КСЯ не столь значительно, как влияние облаков, они могут привести к получению неверных значений *LAI*.

2.5. Спектральные вегетационные индексы

В предыдущем разделе были рассмотрены пример оценки биофизического параметра растительного покрова (*LAI*) по измерениям КСЯ на основе физической модели (уравнения переноса). Существенным ограничением этого подхода является сложность его реализации и ограниченное количество доступных глобальных измерений необходимых модельных параметров. Как отмечалось выше (раздел 2.4) прокси-величинами для биофизических параметров могут служить т.н. вегетационные индексы – арифметические комбинации значений КСЯ в отдельных спектральных каналах. Эти выражения выводятся на основе эмпирических наблюдений и имеют целью увеличение информативности сигнала в отдельных каналах для исследований растительности при одновременном снижении влияния побочных факторов (влияние атмосферы, яркости почвы, эффекта насыщения, зависимости от геометрии наблюдений и т.п.). Подчеркнем, что вегетационные индексы не являются биофизическими параметрами, они так же как и КСЯ остаются *радиометрическими величинами*. Для построения вегетационных индексов в основном используются КСЯ в видимой и инфракрасной областях спектра, т.к. отраженное излучение на этих длинах волн позволяет характеризовать общее состояние растительности, содержание в зелёной массе хлорофилла, азота, влаги (Gitelson, Merzlyak, 1997; Curran, 1989). Например, интервал между красной и ближней ИК областями спектра, называемый «красным краем», чувствителен к концентрации хлорофилла в листьях (Dawson, Curran, 1998). Также интервал длин волн между 0,5 и 0,6 мкм информативен при оценке недостатка азота в листьях и побегах (Peñuelas et al., 1994). ИК область используется для оценки количества влаги в растительных компонентах. Измерения отражательной способности в интервале длин волн 1,65–1,85 мкм информативны при оценке дефицита влаги в листьях, как было показано в работе (Tian et al., 2001). В (Peñuelas et al., 1997) продемонстрирована возможность использования для этих целей каналов с центрами на длинах волн 0,97 мкм, 1,4 мкм и 1,9 мкм. По чувствительности к побочным эффектам и форме функциональной зависимости вегетационные индексы делят на дробные, разностные и почвенно-адаптивные. По поведению изовегетационных линий в спектральном пространстве вегетационные индексы делят на индексы отношения и перпендикулярные индексы.

Использование дробного индекса *RVI* (Ratio Vegetation Index) было впервые описано в работе (Jordan, 1969) для оценки листового покрытия лесной раститель-

ности. Индекс рассчитывался как отношение коэффициента пропускания лесным пологом излучения с длиной волны 0,8 мкм $\tau(NIR)$ к коэффициенту пропускания излучения на 0,675 мкм $\tau(Red)$:

$$RVI = \frac{\tau(NIR)}{\tau(Red)}. \quad (2.42)$$

Однако дистанционными методами коэффициент пропускания напрямую измерить невозможно, и в настоящее время под дробным индексом понимается выражение указанного вида, аргументами которого чаще всего являются КСЯ в красном и ближнем ИК диапазонах, $\rho(Red)$ и $\rho(NIR)$. Этот индекс называется SR (Simple Ratio).

Разностные вегетационные индексы представляют собой разность между измерениями КСЯ в двух различных каналах. Например, *DVI* (Difference Vegetation Index) в виде разности КСЯ в ближнем ИК и красном диапазонах был описан в работе (Tucker, 1979):

$$DVI = \rho(NIR) - \rho(Red). \quad (2.43)$$

Значения *DVI* являются показателем состояния растительности, однако индекс подвержен влиянию атмосферы и геометрии измерений и поэтому без надлежащей атмосферной коррекции может использоваться только локально как во времени, так и в пространстве.

На основе синтеза дробного и разностного индексов был выведен индекс *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index), (Tucker, 1979):

$$NDVI = \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + \rho(Red)}. \quad (2.44)$$

С одной стороны, наличие разности каналов в красной и ближней ИК областях учитывает особенности отражательного спектра здоровой растительности. В то же время наличие измерений КСЯ в каждом из каналов в числителе и знаменателе позволяет существенно уменьшить влияние атмосферы и геометрии наблюдений и проводить более корректное сравнение измерений, сделанных в разное время, чем, например, в случае разностного индекса. Благодаря перечисленным достоинствам, *NDVI* является одним из наиболее популярных вегетационных индексов и активно используется для широкого круга задач, связанных с дистанционным мониторингом растительности. На *рис. 2.21* представлено глобальное распределение индекса *NDVI*, полученное по данным 16-дневного композитного продукта Aqua MODIS (MYD13A2) версии 5 разрешением 1 км за период 20 августа – 4 сентября 2016 г.

Из приведенного изображения следует, что индекс имеет высокую чувствительность к плотности растительного покрова – возникает высокий контраст между плотным и разреженным растительным покровом. Однако индекс резко выходит на насыщение и теряет чувствительность (Амазония, Центральная Африка, Океания).

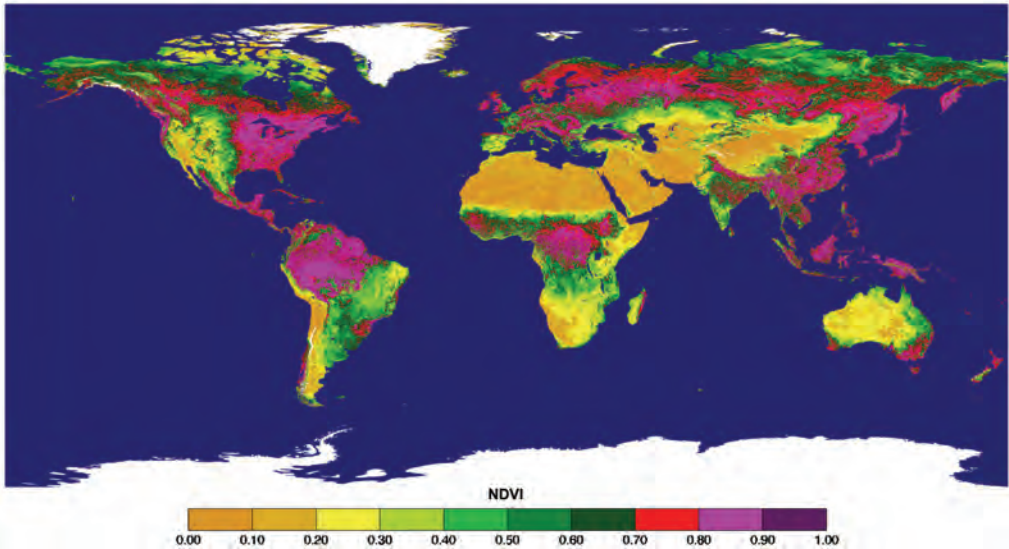


Рис. 2.21. *NDVI* по данным *Aqua/MODIS* (версия 5) (16-дневный композит для 20 августа – 4 сентября 2016), географическая проекция

Для повышения чувствительности *NDVI* при высокой концентрации хлорофилла было предложено использовать нормировочный коэффициент перед значением КСЯ в ближнем ИК канале в выражении для *NDVI* (Gitelson, 2004). Полученный индекс был назван *WDRVI* (Wide Dynamic Range Vegetation Index):

$$WDRVI = \frac{k\rho(NIR) - \rho(Red)}{k\rho(NIR) + \rho(Red)}, \quad (2.45)$$

где $0 < k \leq 1$ – нормировочный коэффициент. Выбор значения параметра k зависит от сенсора и атмосферных условий; при $k = 1$ формула для индекса приводит к *NDVI*, а в случае насыщения, когда $\rho(NIR) \gg \rho(Red)$, коэффициент k должен быть существенно меньше единицы, для того чтобы КСЯ в каналах стали сравнимы.

Заметим, что наиболее популярные вегетационные индексы *NDVI* и *RVI* чувствительны не только к параметрам растительности, но и характеристикам почвы, влияние которой может быть велико для разреженной растительности. С учетом этой проблемы была разработана группа вегетационных индексов, имеющих целью измерение количества биомассы независимо от типа подстилающей поверхности – *PVI*, *SAVI*, *TSAVI* и *MSAVI*.

В основе концепции индекса *PVI* (Perpendicular Vegetation Index) и некоторых других почвенно-адаптивных индексов лежит экспериментально установленный факт: распределение значений КСЯ для открытой почвы в пространстве измерений в красном и ближнем ИК каналах может быть аппроксимировано прямой линией, называемой *линией почв* (раздел 2.4). Линия почв делит плоскость на две части, в одной из которых находятся измерения, соответствующие растительности в любой

фазе её развития и при любом типе подстилающей поверхности, в другой части находятся измерения, соответствующие водным или сильно увлажненным объектам. Перпендикулярный вегетационный индекс был предложен в работе (Richardson, Wiegand, 1977) как евклидова мера отдаленности данной точки в пространстве измерений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах от линии почв (рис. 2.22):

$$PVI = \rho(NIR) \cos(\alpha) - \rho(Red) \sin(\alpha) - b \cos(\alpha), \quad (2.46)$$

где α – угол между линией почв и осью значений КСЯ в красном канале и b – свободный член уравнения линии почв, $\rho(NIR) = \operatorname{tg}(\alpha) \rho(Red) + b$.

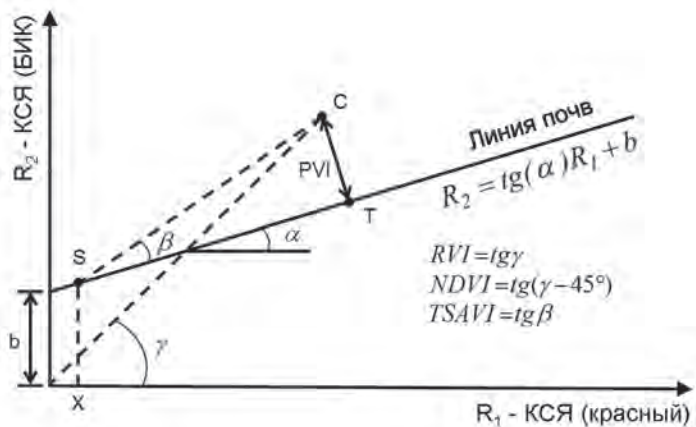


Рис. 2.22. Иллюстрация методов расчёта некоторых вегетационных индексов

PVI обладает одним полезным свойством: его *изовегетационные* линии (линии равных значений индекса) параллельны почвенной линии, поэтому соответствующие одинаковому развитию растительности значения *PVI* являются также одинаковыми для всех яркостей почв вне зависимости от значений КСЯ в каналах. Это позволяет проводить сравнение измерений, сделанных в разных почвенно-климатических зонах, что важно при дистанционном мониторинге растительности в масштабах страны или континента.

Индекс эффективен при наблюдении любой разреженной растительности, в частности, при мониторинге сельскохозяйственных культур, фазы развития которых включают этап всходов на фоне открытой почвы при больших расстояниях между растениями. Вид *PVI* является обобщенной версией разностного индекса, поэтому на его значения сильно влияет состояние атмосферы, облачность, тени облаков, снежный покров.

В работе (Huete, 1988) был теоретически исследован вопрос о влиянии почвы на вегетационные индексы. На рис. 2.23 (слева) в пространстве измерений в красном и ближнем ИК спектральных каналах показаны *изовегетационные* линии *PVI* и *NDVI* – линии, вдоль которых соответствующие индексы постоянны. Рассмотрим

точку (А) в этом пространстве. Если свойства растительности не изменять, а КСЯ почвы уменьшить (перейти от сухой к влажной почве), то можно ожидать, что КСЯ всего покрова изменится вдоль изолинии вегетационного индекса. Однако возникает противоречие – если следовать изолинии *PVI*, то система переместится в точку (С), а если изолинии *NDVI*, то в точку (В). В соответствии с экспериментальными данными (Huete, 1988) КСЯ системы сместится в положение (D) между точками (В) и (С). Следовательно, изолинии обоих индексов непригодны для описания исключительно растительности, они подвержены влиянию почвы. Для концептуального понимания вклада растительности и почвы в КСЯ всего растительного покрова рассмотрим модельные данные, рассчитанные на основе стохастической модели переноса (Shabanov et al., 2000). На рис. 2.23 (справа) показаны изолинии *PVI*, *NDVI*, а также изолиния *LAI*. Изолиния *LAI* характеризует искомые изменения КСЯ системы, когда свойства растительности постоянны, а меняются только свойства почвы. Видно, что изолинии *LAI* не совпадают с изолиниями *NDVI* и *PVI*, являются нелинейными и не имеют общего начала.

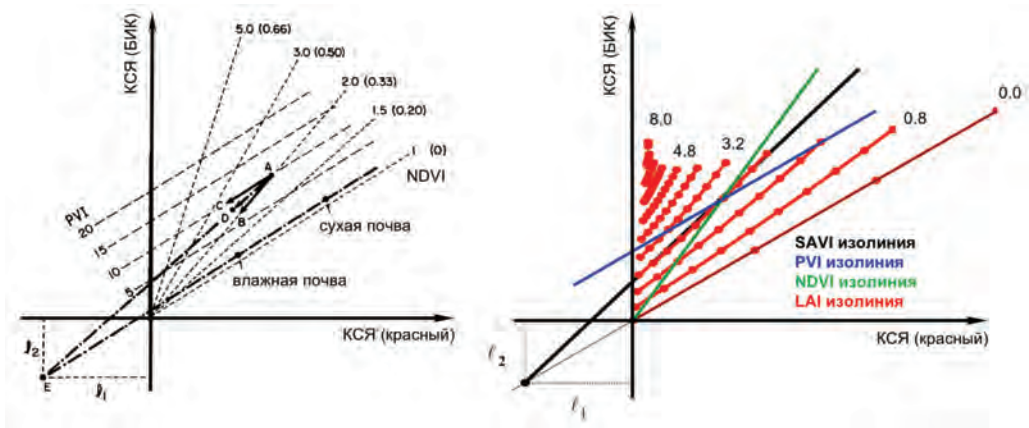


Рис. 2.23. Влияние почвы на вегетационные индексы. Изолинии вегетационных индексов *PVI* и *NDVI* для хлопка получены на основе экспериментальных данных (слева, по данным Huete, 1988). Справа дано сопоставление изолиний вегетационных индексов с изолиниями *LAI*, рассчитанными на основе уравнения переноса

В работе (Huete, 1988) было предложено аппроксимировать изолинии *LAI* изолиниями *NDVI* со сдвинутым началом координат (l_1, l_2). Арифметическое преобразование смещения центра координат эффективно сводится к добавлению слагаемого L в знаменателе. Также для сохранения динамического диапазона индекса в интервале $[-1; 1]$ необходимо ввести поправочный множитель $(1+L)$ в числитель. Таким образом, был получен индекс *SAVI* (Soil Adjusted Vegetation Index):

$$SAVI = (1 + L) \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + \rho(Red) + L}. \quad (2.47)$$

Как было отмечено ранее, данное выражение является аппроксимацией, в частности, поправочный коэффициент зависит от плотности растительного покрова (LAI , структуры), которые сами являются неизвестными. В работе (Huete, 1988) было показано, что значение $L = 0,5$ является оптимальным для минимизации влияния почвы. В дальнейшем разработанный индекс стал основой для целого семейства параметрических индексов вида $SAVI$. В развитие идеи устранения влияния почвы на основе $SAVI$ было предложено эмпирически найденное решение для неизвестного параметра L_1 (Qi et al., 1994). В дальнейшем был разработан итеративный способ расчета коэффициента L , дающий наиболее оптимальное решение задачи минимизации эффекта почвы:

$$L_2 = 1 - \frac{2\rho(NIR) + 1 - \sqrt{[2\rho(NIR) + 1]^2 - 8[\rho(NIR) - \rho(Re d)]}}{2}, \quad (2.48)$$

а индекс типа $SAVI$ с приведенными выше параметрами было предложено называть $MSAVI$ (Modified SAVI), причем индекс с параметром L_1 называют $MSAVI_1$, а с параметром L_2 — $MSAVI_2$. В работе (Baret et al., 1989) предложен индекс $TSAVI$ (Transformed SAVI) из семейства $SAVI$ индексов, использующий концепцию линии почв:

$$TSAVI = \frac{a[\rho(NIR) - a\rho(Re d) - b]}{a\rho(NIR) + \rho(Re d) + ab + X(1 + a^2)}, \quad (2.49)$$

где a и b — коэффициенты линии почв (рис. 2.22), а X — параметр, компенсирующий влияние почвы. В случае, когда почвенная линия проходит через начало координат с коэффициентом наклона равным 1, $TSAVI$ принимает вид $NDVI$. Геометрический смысл индекса — это угол между линией почв и линией, пересекающей линию почв в точке с абсциссой X и проходящей через данную точку C (рис. 2.22).

Для сравнения индексов между собой в лабораторных условиях авторы работы (Rondeaux et al., 1996) провели эксперимент по моделированию влияния подстилающей поверхности на значения индексов семейства $SAVI$ и $NDVI$ на основе модели $SAIL$ (Verhoef, 1984). В качестве подстилающей поверхности в эксперименте использовались 26 различных типов почв от песка до торфа с разной степенью грануляции и влажности, при этом моделировалось прохождение сигнала через растительность с $LAI = [0, 1:8]$ для пяти разных ориентаций плоскостей листьев и двух разных зенитных углах солнца. На основании результатов моделирования авторы заключили, что для мониторинга обычной растительности наиболее устойчивым к влиянию почвы является $TSAVI$, а в случае разреженной растительности могут быть использованы $MSAVI$ и $SAVI$, наиболее чувствительные в области низких значений биомассы.

В дальнейшем был предложен более общий подход для коррекции целого ряда эффектов. Целью разработки индекса EVI (Enhanced Vegetation Index) являлось усиление сигнала от растительности в регионах с высокой биомассой, разделение сигнала от растительности и почвы и минимизации остаточного влияния аэро-

золей в атмосфере (Huete et al., 2002; Miura et al., 2001). *EVI* определен следующим образом:

$$EVI = (1 + L) \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + C_1 \rho(Red) - C_2 \rho(Blue) + L} . \quad (2.50)$$

Параметры определяются индивидуально в зависимости от источника данных. В случае данных MODIS $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7,5$. Заметим, что для многих источников данных КСЯ в голубом канале имеет существенные ограничения (сигнал сильно зашумлен атмосферой или данные доступны только в загубленном разрешении, как в случае MODIS), либо недоступен вообще (для данных AVHRR). Поэтому была разработана упрощенная версия *EVI* (называемая *EVI2*), которая рассчитывается на основе значений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах:

$$EVI2 = G \frac{\rho(NIR) - \rho(Red)}{\rho(NIR) + C \rho(Red) + L} . \quad (2.51)$$

Путем оптимизации (минимизация разницы *EVI* и *EVI2*) были вычислены значения параметров для *EVI2*: $G = 2,5$, $C = 2,4$, $L = 1$ (Jiang et al., 2008).

На *рис. 2.24* показано глобальное распределение *EVI*, полученное на основе 16-дневного композитного продукта Aqua MODIS (MYD13A2) версии 5 разрешением 1 км за период 20 августа – 4 сентября 2016 г.

Сравним его с соответствующим распределением *NDVI* приведенным выше (*рис. 2.21*). Хотя пространственные распределения схожи, значения *EVI* более плавно изменяются с ростом плотности растительного покрова, что позволяет отслеживать вариации в плотной растительной среде (например, Амазония), что невозможно при использовании индекса *NDVI*. Количественное сравнение чувствительности индексов *NDVI* и *EVI*, рассчитанных на основе данных VIIRS, было рассмотрено в работе (Shabanov et al., 2015). На *рис. 2.25* приведено сравнение индексов *NDVI* (вверху) и *EVI* (внизу), вычисленных на основе стандартных атмосферно скорректированных продуктов данных VIIRS (ось ординат) и рассчитанных на основе значений КСЯ после атмосферной коррекции с использованием измерений станцией AERONET параметров атмосферы (ось абсцисс). Фильтрация данных производилась с использованием облачной маски для трех уровней вероятности обнаружения облаков – все пиксели (черным), достоверно безоблачные пиксели (синим) и достоверно безоблачные без теней и краевых эффектов облаков (красным). Приведены также гистограммы значений индексов для различных уровней фильтрации облачности. Графики показывают эффективность облачной маски для фильтрации эффекта влияния облаков на *NDVI* – «хвост» распределения *NDVI* при низком значении индекса эффективно убирается. Помимо этого маска облаков эффективно фильтрует завышенные значения *NDVI*. Это завышение индекса возникает из-за эффекта завышенной оптической толщины аэрозолей вблизи облаков (Shabanov et al., 2015). Ситуация с *EVI* иная – индекс нуждается в фильтрации облаков, но его значения не чувствительны к вышеописанному влиянию аэрозолей.

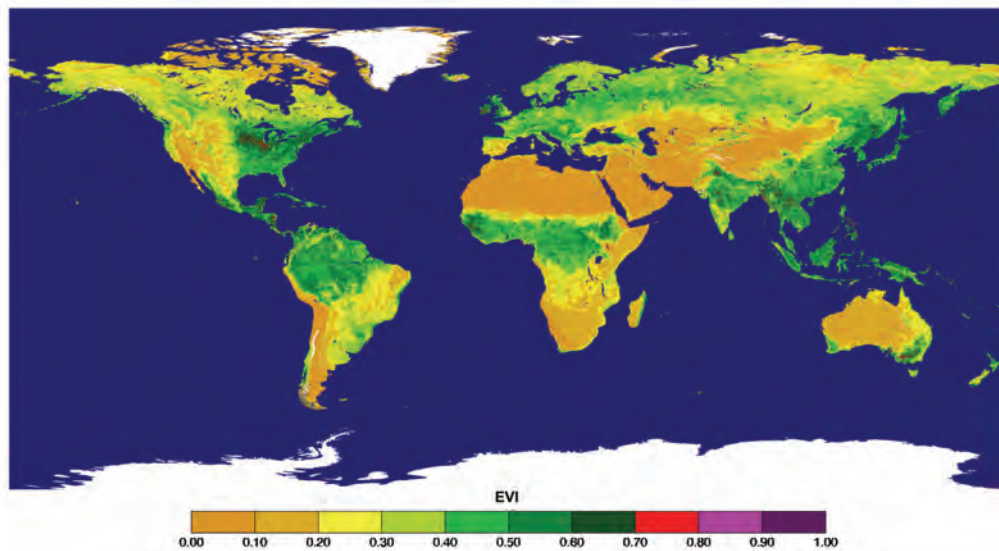


Рис. 2.24. EVI по данным Aqua/MODIS, версия 5 (16-дневный композит для 20 августа – 4 сентября 2016), географическая проекция

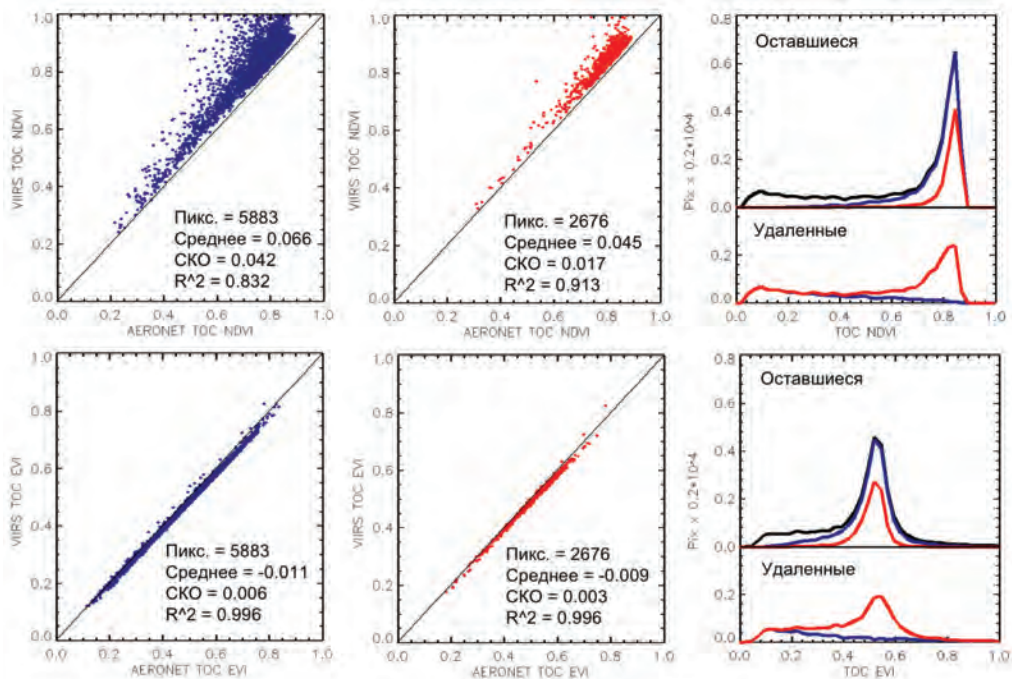


Рис. 2.25. Влияние аэрозолей и облаков на вегетационные индексы NDVI и EVI, рассчитанные по результатам измерений КСЯ на верхней границе растительного покрова (TOC, top of canopy); средние величины и СКО, приведенные на графиках, относятся к разнице значений вегетационных индексов по данным VIIRS и AERONET (Shabanov et al., 2015)

Глава 3

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

3.1. Фильтрация эффектов маскирующего влияния облаков

Предварительная обработка временных рядов данных ДЗЗ, являющаяся ключевым этапом автоматизированного спутникового картографирования и оценки характеристик растительного покрова, направлена на снижение влияния мешающих факторов, таких как облака и образуемые ими тени, наличие сезонного снежного покрова и аппаратных шумов. Эффективное решение этих задач сопряжено с необходимостью создания соответствующих автоматических технологий, обеспечивающих получение производных продуктов данных, характеризующихся более высоким (по сравнению с данными, непосредственно получаемыми системами ДЗЗ) уровнем качества с точки зрения удовлетворения требованиям методов спутникового картографирования растительного покрова (Барталев и др., 2004). Разработка методов и технологий предварительной обработки данных ДЗЗ требует использования знаний об особенностях спектрально-отражательных характеристик зондируемых объектов, оптико-физических моделей формирования спутниковых изображений для компенсации эффектов анизотропии отражения земной поверхности при меняющихся угловых условиях ее освещения и наблюдения, алгоритмов статистической фильтрации для исключения случайных шумов (Барталев и др., 2011а, 2011б).

Методы предварительной обработки данных ДЗЗ призваны обеспечить максимально возможное снижение влияния мешающих факторов, предусматривая следующие основные этапы:

- исключение областей спутниковых изображений, характеризующихся значениями зенитных углов освещения и наблюдения, превышающими заданный порог;
- исключение участков спутниковых изображений, соответствующих снежному и облачному покрову;

- исключение участков спутниковых изображений, соответствующих теням от облаков;
- статистическая фильтрация случайных шумов во временных рядах данных ДЗЗ.

К числу факторов, определяющих сложность разработки алгоритмов автоматического детектирования облачности, прежде всего, следует отнести чрезвычайно высокий уровень изменчивости ее отражательных и излучательных характеристик в различных спектральных диапазонах. Помимо достаточно надежно детектируемых плотных облаков, обладающих высоким коэффициентом отражения в видимом диапазоне длин волн и низкой радиояркой температурой, существуют также облачные структуры различной степени прозрачности, спектрально-яркостные характеристики которых в значительной степени подвержены влиянию отраженного от подстилающей земной поверхности солнечного излучения. Разработка критериев и автоматических алгоритмов выявления такого рода полупрозрачной облачности представляет собой существенно более сложную в методическом отношении задачу. В ряде случаев проблема автоматического детектирования облаков осложняется и наличием схожих с ними по высокой отражательной способности объектов на земной поверхности, таких как снег, песок, крыши домов и некоторые другие.

В основу решения задачи автоматического выявления теней от облаков может быть положено использование характерных для них низких значений коэффициента отражения. Однако решение этой относительно простой на первый взгляд задачи существенно осложняется высоким уровнем вариабельности спектрально-отражательных характеристик затененной поверхности, меняющихся в широких диапазонах. Дополнительные сложности построения алгоритмов выявления облаков привносятся их вертикальной структурой и сопряженными с ее наличием эффектами формирования собственных теней, вносящих свой вклад в увеличение вариабельности спектрально-яркостных характеристик поверхности облачного покрова.

Применимость различных методов фильтрации эффектов маскирующего влияния облаков и теней в первую очередь зависит от наличия в спутниковой системе ДЗЗ необходимых спектральных каналов, обеспечивающих измерение отражательных и излучательных характеристик, лежащих в основе соответствующих алгоритмов детектирования. Анализ, выполненный в первые годы после запуска в эксплуатацию спутникового спектрорадиометра Terra-MODIS, показал, что распространяемые Геологической службой США стандартные продукты данных (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>) этой системы ДЗЗ по уровню качества выполняемой предварительной обработки не в полной мере способны удовлетворить требованиям создания на их основе эффективных автоматических методов картографирования и мониторинга растительного покрова. Это обстоятельство потребовало разработки в ИКИ РАН описанной ниже автоматизированной технологии предварительной обработки данных MODIS, исходными для которой являются стандартные продукты данных MOD09, содержащие, в частности, скорректированные для учета влияния атмосферы значения КСЯ, измеренные в различных спектральных диапазонах с пространственным разрешением 250 м и 500 м, а также информацию о геометрических параметрах положения солнца и прибора в момент наблюдения.

Для первичного отбора спутниковых данных ДЗЗ, пригодных для дальнейшего использования по геометрическим условиям освещения и наблюдения, используется следующая совокупность пороговых критериев: $VZA > 40^\circ$ и $SZA > 80^\circ$, где VZA – зенитный угол наблюдения, SZA – зенитный угол положения Солнца.

Детектирование участков с наличием облачного и снежного покрова выполняется с использованием данных измерений КСЯ в голубом (0,459–0,479 мкм) и среднем ИК (1,628–1,652 мкм) каналах MODIS ($R3$ и $R6$ соответственно). В основе алгоритма детектирования лежит использование нормализованного разностного индекса снега $NDSI$, определяемого по формуле:

$$NDSI = \frac{R3 - R6}{R3 + R6}, \quad (3.1)$$

и априорных знаний об отражательных свойствах различных типов подстилающей поверхности.

С целью отнесения каждого пикселя спутникового изображения к одному из четырех классов (облачность, полупрозрачная облачность, снег, свободная от влияния облачности и снега земная поверхность) разобьем пространство признаков $R3$ и $NDSI$ следующим образом (рис. 3.1):

- «снег», если $R3 > 0,05$ и $NDSI > 0,1$;
- «облачность», если $R3 > 0,05$ и $-0,2 < NDSI \leq 0,1$;
- «полупрозрачная облачность», если $R3 > 0,05$ и $-0,35 < NDSI \leq -0,2$;
- «земная поверхность», во всех остальных случаях.

Пикселям, окружающим выделенные на предыдущем этапе участки классов «облачность» и «полупрозрачная облачность», также присваиваются их имена (коды), если значения $R3$ рассматриваемых пикселей не ниже значений $R3$ соседних с ними граничных пикселей областей изображений, отнесенных к классам облачности.

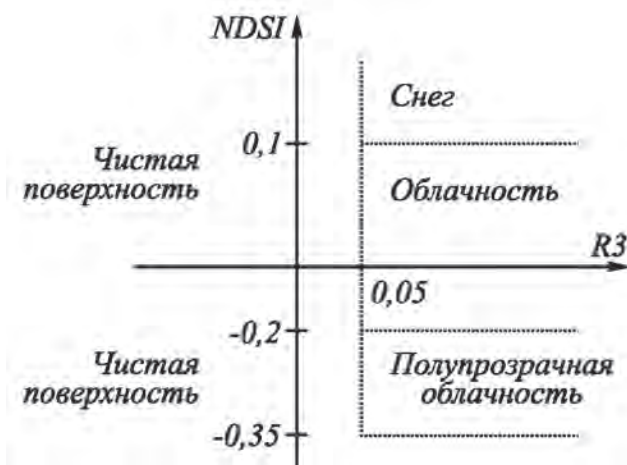


Рис. 3.1. Пороговое разделение пикселей земной поверхности, облачности и снежного покрова в двумерном пространстве значений признаков $R3$ - $NDSI$

Для выявления на спутниковом изображении затененных облаками участков земной поверхности целесообразно применение оптико-геометрического моделирования потенциального местоположения теней (рис. 3.2), позволяющего снизить вероятность их ошибочного детектирования за счет пространственного ограничения области поиска. Для проведения подобного моделирования необходима информация об углах наблюдения и положения Солнца, а также высоты облака. В отсутствие точных данных о высотах облаков может быть задано максимально возможное их значение для построения областей изображения, заведомо содержащих подлежащие выделению пиксели. Для метода предварительной обработки данных MODIS в качестве максимально возможной высоты облаков эмпирически выбрано значение $h = 12$ км.

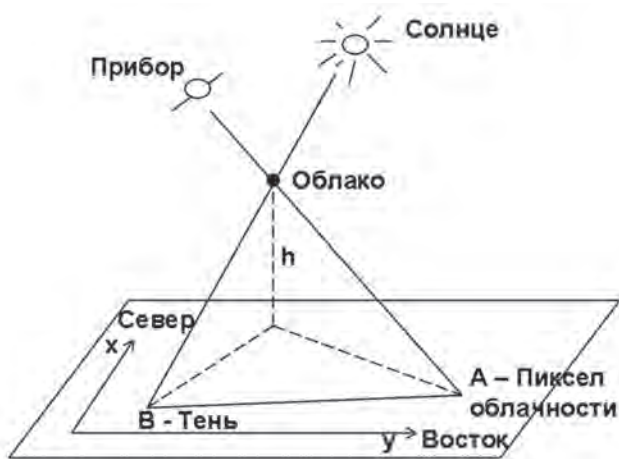


Рис. 3.2. Геометрическое расположение линии тени от облака AB на наблюдаемой спутниковым прибором земной поверхности

Если ввести прямоугольную систему координат с началом в рассматриваемом пикселе A , отнесенном к классу «облачность», с осью Ox , направленной на север, и осью Oy , направленной на восток, то граничная точка линии тени B на изображении для облака высотой h задается в этой системе следующими координатами:

$$\begin{aligned} x &= h(\cos(\psi) \operatorname{tg}(\theta) - \cos(\beta) \operatorname{tg}(\delta)) \\ y &= h(\sin(\psi) \operatorname{tg}(\theta) - \sin(\beta) \operatorname{tg}(\delta)) \end{aligned} \quad (3.2)$$

где ψ – азимутальный угол наблюдения, θ – зенитный угол наблюдения, β – азимутальный угол положения Солнца, δ – зенитный угол положения Солнца.

Как правило, описываемая формулой (3.2) геометрическая линия потенциальной тени пересекает пиксели, соответствующие как затененным участкам, так и свободной от влияния облаков земной поверхности, что обуславливает необходимость проведения дополнительной фильтрации. Так, анализ изменений значений отражательной способности подстилающей поверхности вдоль геометрической ли-

нии потенциальной тени позволяет определить фактическую границу затененных участков по скачкообразному росту КСЯ в ближнем ИК канале MODIS (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Пример изменений значений КСЯ в ближнем ИК канале MODIS вдоль геометрической линии потенциальной тени от облака: А – зона остаточной облачности, В – область тени, С – свободная от влияния облаков земная поверхность

Отдельно взятая геометрическая линия тени, построенная от облака, может быть разделена на три характерных участка. По направлению от края сначала располагается участок открытой поверхности, который может включать остаточную облачность. В зависимости от геометрии освещения и наблюдения длина этого участка может быть минимальна. Далее следует теневая область. Она характеризуется резким снижением КСЯ, однако для ее контрастного наблюдения следует выбирать каналы с высокими значениями КСЯ для безоблачной открытой поверхности, например, ближний ИК (0,841–0,876 мкм) канал MODIS. Третий участок линии тени закрывает ошибочно маскированную территорию, что является следствием излишней высоты облака, заданной в модели. Исходные данные, полученные вдоль геометрической линии тени, могут быть в некоторой степени зашумлены, поэтому перед анализом они должны быть обработаны медианным фильтром. Сама процедура анализа линии заключается в поиске пикселя, характеризующегося устойчивым падением КСЯ при движении от ее конца к облаку. Весь участок геометрической линии тени до этого пикселя может быть возвращен в класс чистой поверхности.

Выполняемая на следующем этапе предварительной обработки данных MODIS статистическая фильтрация основана на анализе временных рядов данных и направлена на выявление ложно детектированных затененных облаками участков земной поверхности. Одной из основных причин возможного появления так называемых ложных теней от облаков является ошибочное отнесение к последним участков снега с недостаточно высоким значением индекса $NDSI$ при детектировании облачности согласно используемым пороговым критериям. Пиксель с координатами (x,y) относится к ложной тени и возвращается в класс «земная поверхность», если 1) он был отнесен к классу тени на предыдущем этапе предварительной

обработки; 2) пиксель не попадал в класс «земная поверхность» в течение последних двадцати дней наблюдений; 3) выполняется следующее условие:

$$Rl(x, y; t) > M_{Rl}(x, y; t - 20 : t) + \sigma_{Rl}(x, y; t - 20 : t), \quad (3.3)$$

где $Rl(x, y; t)$ – значение КСЯ данного пикселя в красном (0,62–0,67 мкм) канале MODIS, t – номер дня проведения рассматриваемого наблюдения, $M_{Rl}(x, y; t - 20 : t)$ и $\sigma_{Rl}(x, y; t - 20 : t)$ – средняя величина и стандартное отклонение результатов безоблачных измерений КСЯ данного пикселя в красном канале прибора за последние 20 дней соответственно.

Фильтрация остаточного влияния мешающих факторов и сбойных пикселей осуществляется на основе анализа временных рядов данных MODIS, полученных в течение заданного периода усреднения (формирования композитного изображения) и отнесенных на предыдущих этапах предобработки к классу «земная поверхность». Также для повышения уровня корректности статистических оценок в анализ включаются данные, полученные в течение 10 дней до и 10 дней после выбранного периода усреднения. Отделение пикселей с высоким уровнем случайного шума проводится отдельно для каждого из рассматриваемых каналов на основе следующего критерия:

$$|R(x, y; t) - M_R(x, y; t_1 - 10 : t_2 + 10)| \geq 2 \cdot \sigma_R(x, y; t_1 - 10 : t_2 + 10), \quad (3.4)$$

где $R(x, y; t)$ – значение КСЯ данного пикселя с координатами (x, y) , $t \in [t_1 : t_2]$ – номер дня проведения рассматриваемого наблюдения, t_1 и t_2 – номера дней начала и конца заданного периода усреднения соответственно, $M_R(x, y; t_1 - 10 : t_2 + 10)$ и $\sigma_R(x, y; t_1 - 10 : t_2 + 10)$ – средняя величина и стандартное отклонение значений КСЯ данного пикселя за указанный период соответственно.

В результате выполнения перечисленных выше шагов формируется набор «масок» с указанием статуса каждого пикселя (рис. 3.4), используемых для последующего осреднения очищенных данных MODIS за заданные интервалы времени. Проведение предварительной обработки ежедневных данных MODIS позволяет в значительной мере снизить влияние мешающих факторов и дает возможность построения композитных изображений за различные промежутки времени с редуцированным влиянием облаков, сезонного снежного покрова и аппаратных шумов.

Построение временных композитных изображений для каждого канала основано на поиске минимального отклонения $\Delta_{MIN}(x, y; t_1 : t_2)$ не замаскированного по каким-либо критериям измерения КСЯ в рассматриваемом канале от среднего значения $M_R(x, y; t_1 : t_2)$, полученного также по ряду незамаскированных наблюдений за выбранный временной промежуток осреднения $[t_1 : t_2]$. Таким образом, в результирующее композитное изображение каждого канала отдельно попадает значение R , для которого выполняется следующее условие:

$$|R(x, y; t) - M_R(x, y; t_1 : t_2)| = \Delta_{MIN}(x, y; t_1 : t_2), \quad (3.5)$$

где $R(x, y; t)$ – значение КСЯ данного пикселя с координатами (x, y) , $t \in [t_1 : t_2]$ – номер дня проведения рассматриваемого наблюдения.

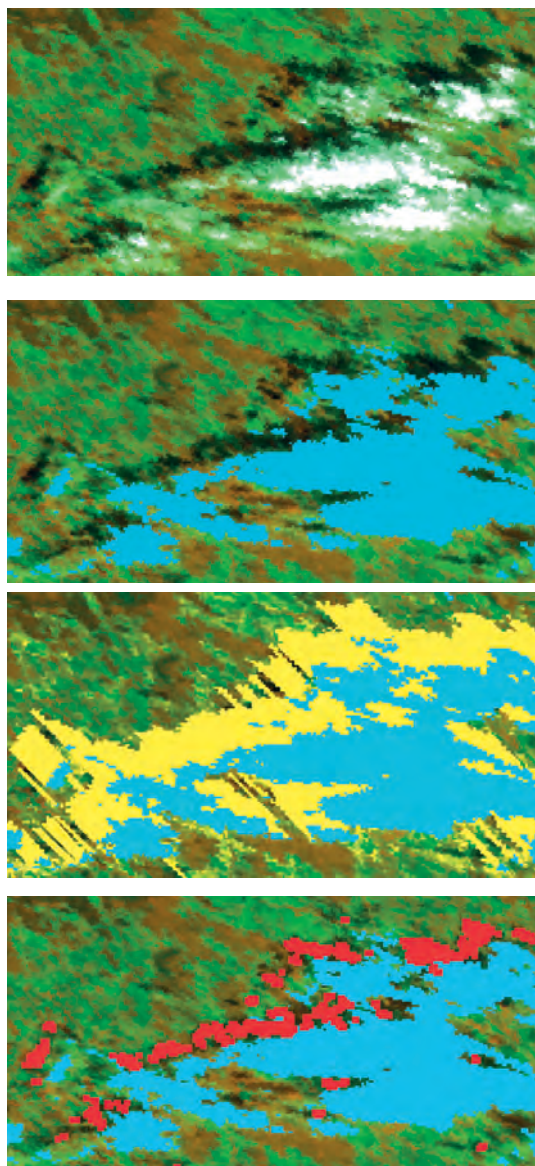


Рис. 3.4. Этапы маскирования спутниковых изображений (сверху вниз): исходное изображение, пороговая фильтрация облачности, построение геометрических линий теней, фильтрация геометрических линий теней

В зависимости от поставленных задач (Жарко и др., 2013; Барталев и др., 2015а) временное осреднение данных MODIS может производиться за любой отрезок времени. Однако если незамаскированные данные в этот период времени отсутствуют, то в композитное изображение попадает величина, характеризующая отсутствие измерений. Примеры получаемых изображений представлены на *рис. 3.5*.

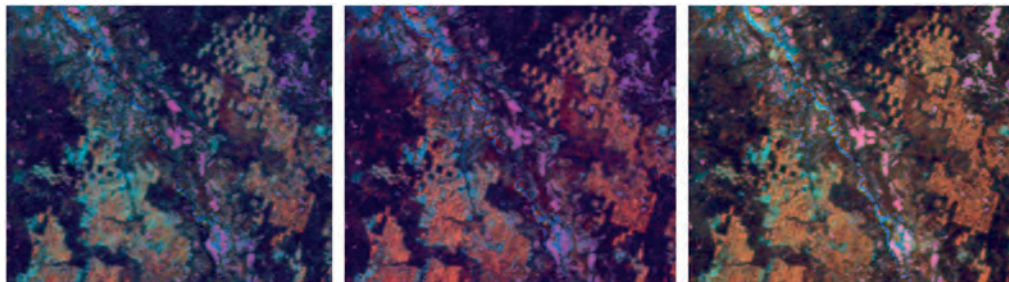


Рис. 3.5. Примеры фрагментов весеннего, летнего и осеннего композитного изображения соответственно (псевдоцвета R: КСЯ в диапазоне 0,841–0,876 мкм; G: КСЯ в диапазоне 1,628–1,652 мкм; B: КСЯ в диапазоне 0,62–0,67 мкм)

3.2. Метод радиометрической коррекции искажений отражательных характеристик земного покрова в данных спутниковых измерений, вызванных влиянием рельефа местности

Применение методов ДЗЗ для картографирования и мониторинга растительного покрова в регионах с выраженным рельефом местности сопряжено с необходимостью учета вносимых им радиометрических искажений в данные измерений характеристик отраженного земной поверхностью излучения. Возрастающая под влиянием рельефа местности внутрикласовая изменчивость значений КСЯ объектов земной поверхности служит дополнительным источником ошибок, приводя, как правило, к снижению точности распознавания типов растительного покрова, выявления изменений его состояния и оценки количественных характеристик.

Возможные методические пути учета такого рода радиометрических искажений в данных ДЗЗ часто сопряжены с использованием двух различных подходов, а именно:

- стратификация территории с выделением относительно однородных по характеристикам рельефа местности (азимут и крутизна склона) участков с последующей независимой обработкой данных ДЗЗ в пределах каждой из множества выделенных страт;
- радиометрическая коррекция данных ДЗЗ для учета влияния рельефа местности (часто называемая топографической нормализацией) с использованием математических моделей, описывающих искажения в данных измерений параметров отраженного излучения как функции характеристик рельефа, геометрических условий освещения и наблюдения земной поверхности.

В данном разделе описаны возможности топографической нормализации спутниковых изображений с использованием математических моделей, характеризующих влияние рельефа местности на данные дистанционных измерений параметров отраженного излучения, в рамках второго из упомянутых выше подходов.

Топографическая нормализация является одним из важных этапов предварительной обработки спутниковых изображений, часто применяясь в сочетании с другими видами радиометрической коррекции, направленными на компенсацию эффектов, вызванных изменениями геометрических условий освещения и наблюдения земной поверхности, анизотропией отражения ею излучения, пространственной неоднородностью его рассеяния и поглощения атмосферой, некоторыми другими факторами. При этом проведение атмосферной коррекции с использованием таких методов, как, например, 6S (Vermote et al., 1997b) или DOS (Dark Object Subtraction) (Chavez, 1996), выполняется в предположении горизонтальной плоской земной поверхности.

Целью топографической нормализации является преобразование дистанционно измеренных значений КСЯ наклонных участков земной поверхности в потенциально присущие им при горизонтальном положении поверхности величины с тем, чтобы снизить вызванную различиями ориентации и крутизны склонов вариабельность отражательных характеристик однотипных объектов (Gao, Zhang, 2008a). К настоящему времени в научной литературе предложено и описано множество методов топографической нормализации данных ДЗЗ, основанных на различных моделях.

В начале 1980-х годов была предложена модель Cosine (Teillet et al., 1982), впоследствии улучшенная и положенная в основу разработки алгоритма, получившего известность как модель топографической нормализации C (Gao, Zhang, 2008b; Huang et al., 2005). Вместе с тем, в силу предположения о ламбертовском характере отражения излучения земной поверхностью, лежащего в основе модели C, она имеет весьма ограниченную область своего корректного применения, внося значительные ошибки в результаты восстановления КСЯ отдельных участков изображения. Другая предложенная модель SCS (Sun-Canopy-Sensor) (Gu, Gillespie, 1998) и ее модифицированная версия SCS + C (Soenen et al., 2005) используют настроечный параметр C , введенный для улучшения описания взаимосвязей между типами растительного покрова и характеристиками отраженного излучения.

Принципиально новый этап развития методов топографической нормализации данных ДЗЗ, стимулируемый стремлением преодолеть ограничения, порожденные допущением ламбертовского характера отражения излучения земной поверхностью, связан с разработкой модели Миннаерта (Smith et al., 1980). Модель Миннаерта рассматривает зондируемую поверхность в качестве неламбертовского отражателя излучения, а введенная в нее эмпирическая константа K зависит от типа земного покрова, крутизны склона и длины волны. Однако, несмотря на общее заметное улучшение результатов, получаемых с использованием модели Миннаерта, на территориях с высокими значениями зенитного угла Солнца топографическая нормализация при постоянной величине K может приводить к эффектам гиперкоррекции. Упрощение модели с включением в нее используемых в алгоритме SCS подходов привело к созданию модели топографической нормализации Minnaert + SCS (Reeder, 2002).

Вместе с тем сравнительные исследования различных моделей топографической нормализации данных ДЗЗ показывают (Hantson, Chuvieco, 2011), что результаты использования какого-либо подхода для коррекции одномоментного спутникового изображения могут быть максимально приближены к идеальным.

Однако для серии наблюдений изменения, связанные с геометрией освещения, могут снизить эффективность топографической нормализации.

Известные в настоящее время модели топографической нормализации, опирающиеся на использование цифровой модели рельефа (ЦМР), можно условно классифицировать следующим образом:

- эмпирико-статистические модели (Teillet et al., 1982; Vincini et al., 2002);
- ламбертовские модели (Civco, 1989; Dymond, Shepherd, 1999);
- неламбертовские модели (Smith et al., 1980; Ekstrand, 1996).

Некоторые ламбертовские и неламбертовские модели топографической нормализации представлены в *табл. 3.1* (Ming-Liang et al., 2014). Эти методы могут быть применены как к полученным на верхней границе атмосферы, так и к приведенным к уровню земной поверхности (атмосферно скорректированным) данным спутниковых измерений КСЯ.

Таблица 3.1. Модели топографической нормализации данных ДЗЗ

Название модели	Модель	Автор
1 Cosine	$R_n = R \cdot (\cos(\theta_s) / \cos(i))$	Teillet
2 C-HuangWei	$R_n = (R - R_{min}) \cdot \left(\frac{\cos(\theta_s) - \cos(i)_{min}}{\cos(i) - \cos(i)_{min}} \right) + R_{min}$	Huang et al.
3 SCS+C	$R_n = R \cdot \left(\frac{\cos(\theta_s) \cdot \cos(S) + C}{\cos(i) + C} \right)$	Soenen et al.
4 Minnaert	$R_n = R \cdot \left(\frac{\cos(e)}{\cos^K(i) \cdot \cos^K(e)} \right)$	Smith et al.
5 Minnaert+ SCS	$R_n = R \cdot \left(\frac{\cos^K(\theta_s) \cdot \cos(S)}{\cos^K(i)} \right)$	Reeder

В приведенных в *табл. 3.1* математических выражениях приняты следующие обозначения: R_n – приведенное к горизонтальной поверхности значение КСЯ; R – измеренное значение КСЯ; R_{min} – минимальное значение КСЯ на рассматриваемой территории; θ_s – зенитный угол Солнца; S – угол наклона (крутизна) склона; i – угол падения солнечного излучения; e – угол между направлением на сенсор и нормалью к земной поверхности в наблюдаемой точке; θ_v – зенитный угол наблюдения (на *рис. 3.6* показано, что $e = S$ при $\theta_v = 0$); C – эмпирическая константа; K – коэффициент Миннаерта. Величина $\cos(i)$ может быть вычислена как:

$$\cos(i) = \cos(\theta_s) \cdot \cos(S) + \sin(\theta_s) \cdot \sin(S) \cdot \cos(\phi_s - A), \quad (3.6)$$

где ϕ_s – азимутальный угол Солнца, A – ориентация склона.

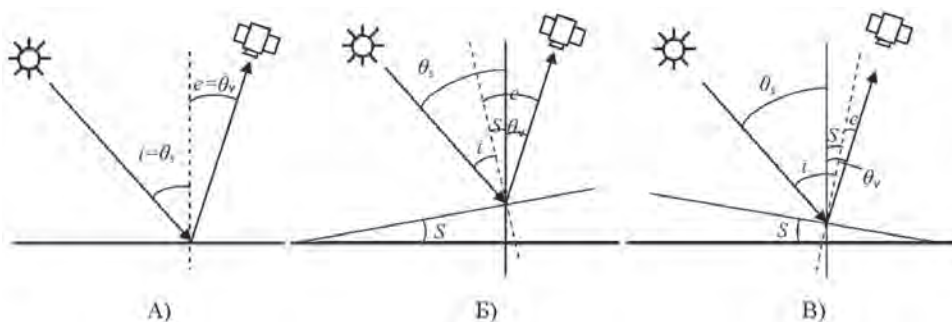


Рис. 3.6. Геометрическая модель «Солнце-поверхность-сенсор» (Ming-Liang et al., 2014); А) – горизонтальная поверхность; Б) и В) – варианты ориентации склона, в зависимости от которых величина e равна либо сумме S и θ_v , либо их разности

Наиболее широко используемая для топографической нормализации данных ДЗЗ модель Миннаерта учитывает неламбертовский характер отражения поверхности через использование эмпирической константы K , настраиваемой для различных типов земного покрова. Значения K меняются в диапазоне от 0 до 1 в зависимости от типа земного покрова и длины волны излучения. При $K = 1$ наблюдаемая поверхность соответствует отражателю ламбертовского типа.

Оценка оптимального значения эмпирической константы K для заданного типа земного покрова может быть получена на основе линейной регрессии и следующего преобразования модели Миннаерта:

$$R \cdot \cos(e) = R_n \cdot \cos^K(i) \cdot \cos^K(e). \quad (3.7)$$

Логарифмируя обе части уравнения (3.7), приходим к следующему выражению:

$$\ln(R \cdot \cos(e)) = \ln(R_n) + K \cdot \ln(\cos(i) \cdot \cos(e)). \quad (3.8)$$

Введя обозначения $X = \ln(\cos(i) \cdot \cos(e))$, $Y = \ln(R \cdot \cos(e))$ и $B = \ln(R_n)$, запишем уравнение (3.8) в виде:

$$Y = K \cdot X + B. \quad (3.9)$$

Таким образом, в предположении постоянной B в пределах одного типа земного покрова оценка оптимальной величины K может быть получена методом регрессионного анализа с расчетом входящих в выражение (3.9) значений X и Y на основе информации о геометрических параметрах освещения, наблюдения и рельефа (обычно по данным ЦМР) и данных измерений КСЯ.

В результате топографической нормализации данных ДЗЗ ожидается, в частности, минимизация различий между изображениями участков затененных и освещенных склонов, а также горизонтально-ровной земной поверхности, относящихся к одному типу земного покрова. Описанный выше метод оценки коэффициента Миннаерта K может быть успешно применен к многоканальным (в общем случае)

изображениям, свободным от влияния облачности и других мешающих факторов, не связанных непосредственно с земной поверхностью. Однако часто имеющая место подверженность данных оптических спутниковых наблюдений влиянию облаков затрудняет регрессионную оценку K на основе выражения (3.9) и требует проведения предварительной фильтрации исходных данных ДЗЗ. В этой связи для оценки величины K представляется целесообразным использование предварительно очищенных от влияния облаков данных, что может быть достигнуто построением так называемых композитных спутниковых изображений, сформированных на основе множества спутниковых наблюдений за заданный временной интервал (Барталев и др., 2004). Исключая зашумленные участки изображений на основе некоторой независимо применяемой процедуры предварительной обработки данных ДЗЗ (Барталев и др., 2011б) и анализируя геометрические условия освещения земной поверхности, можно оценить средние значения КСЯ освещенных и затененных склонов, характеризуемых однотипным земным покровом ($R(M_s)$ и $R(M_n)$ соответственно). Соотношение $R(M_n)/R(M_s)$ в каждом спектральном канале изображения можно рассматривать как функцию, параметрами которой является длина волны, величина коэффициента Миннаерта K , использованная для нормализации изображений, и крутизна склона. Варьируя значения величины K и рассматривая отдельно участки земной поверхности в некоторых диапазонах величин крутизны склонов, можно получить такое значение K , при котором для данных длины волны и крутизны склона соотношение $R(M_n)/R(M_s)$ будет стремиться к единице. Оптимальное значение K соответствует $R(M_n)/R(M_s) = 1$. При этом следует отметить, что в летний период дистанционных наблюдений при относительно небольших значениях зенитного угла Солнца крутизна склона оказывает слабое влияние на выбор величины K (Dengsheng et al., 2008).

Метод радиометрической коррекции влияния рельефа местности, предложенный выше, был апробирован на данных спутниковой системы ДЗЗ PROBA-V с пространственным разрешением 115 м, полученных на территорию Приморского края в период с марта 2014 года по март 2016 года. Система PROBA-V обладает четырьмя спектральными каналами: голубой (0,440–0,487 мкм), красный (0,614–0,696 мкм), ближний ИК (0,772–0,902 мкм) и средний ИК (1,570–1,635 мкм). В качестве цифровой модели рельефа были использованы данные SRTM, деградированные до уровня пространственного разрешения данных PROBA-V. Настройка модели проводилась по участкам хвойных и смешанных лесов в соответствии с картой растительного покрова России (Барталев и др., 2011а).

Для нормализации данных, полученных в условиях свободной от снежного покрова земной поверхности, описанным выше методом были получены фиксированные оценки значений K для красного, ближнего ИК и среднего ИК спектральных каналов.

В зимний период наблюдений, при наличии снежного покрова на земной поверхности и высоких значениях зенитного угла Солнца, было отмечено, что на выбор оптимального значения K сильное влияние оказывает величина крутизны склона. На рис. 3.7 представлена зависимость $R(M_n)/R(M_s)$ для красного канала PROBA-V от крутизны склона при нескольких фиксированных значениях K . Построение зависимости соотношения $R(M_n)/R(M_s)$ от величины K при фиксированной крутизне склона (рис. 3.8) позволяет оценить оптимальное значение K

при котором $R(M_n) / R(M_s) = 1$. В данном случае указанная выше взаимосвязь имеет линейный вид.

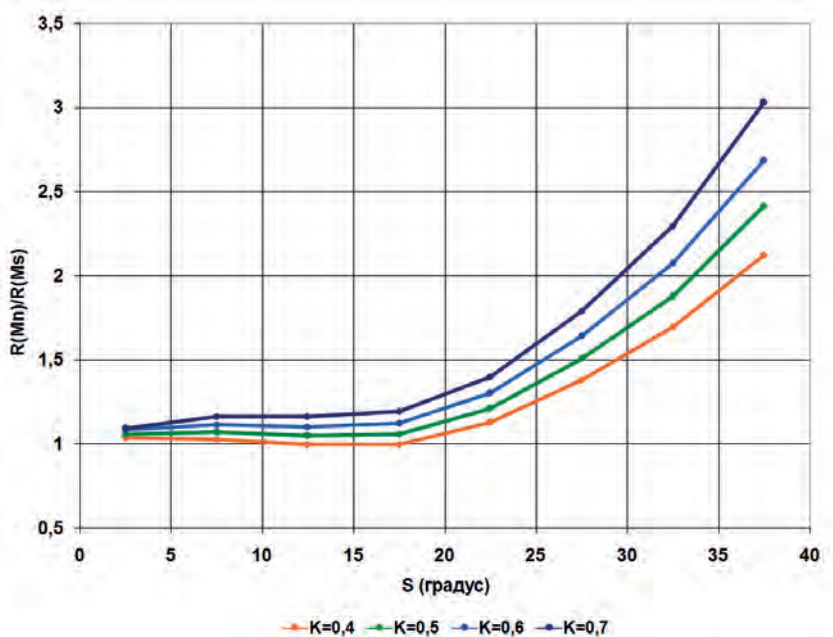


Рис. 3.7. Зависимость отношения $R(M_n) / R(M_s)$ от крутизны склона при различных значениях коэффициента Миннаерта для красного канала PROBA-V

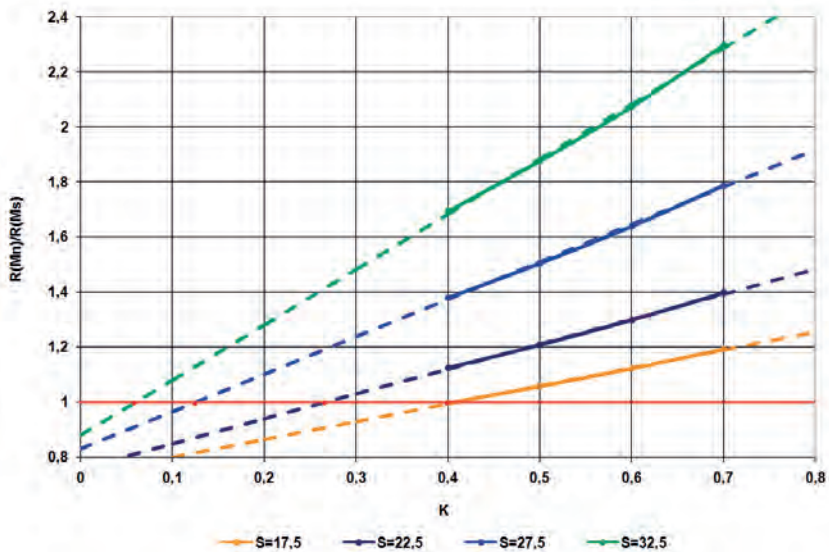


Рис. 3.8. Зависимость отношения $R(M_n) / R(M_s)$ от коэффициента Миннаерта при различной крутизне склонов для красного канала PROBA-V (сплошные линии построены по экспериментально измеренным значениям, пунктирной линией показана экстраполяция функций до пересечения с линией $R(M_n) / R(M_s) = 1$)

Исследование полученных соотношений позволяет построить зависимость оптимального значения коэффициента Миннаерта от крутизны склона (рис. 3.9) для выбранного спектрального канала. При этом в зимний период наблюдений при наличии снежного покрова на земной поверхности наибольшей информативностью характеризуются данные PROBA-V в красном и ближнем ИК спектральных каналах. В то же время следует отметить, что в определенных условиях могут проявляться факторы, вызывающие отклонение установленных зависимостей от ожидаемого вида. В частности, такое отклонение может иметь место в условиях покрытой снегом земной поверхности за счет возрастания вклада переотраженного соседними склонами излучения или появления вызванных наличием снежного покрова отклонений фактического (на момент наблюдений) рельефа подстилающей поверхности от описывающей его цифровой модели.

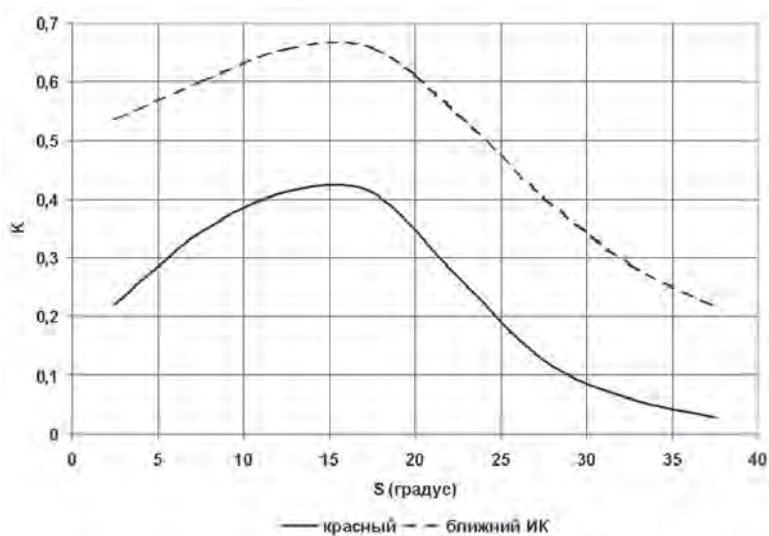


Рис. 3.9. Зависимость оптимального значения коэффициента Миннаерта от крутизны склона для красного и ближнего ИК каналов PROBA-V в условиях покрытой снегом земной поверхности

По результатам работы с данными PROBA-V на территорию Приморского края после фильтрации влияния мешающих факторов и топографической нормализации были получены разносезонные композитные изображения в различных спектральных каналах. Проведенная топографическая нормализация позволила значительно снизить влияние рельефа местности на радиометрические характеристики данных и, таким образом, повысить эффективность дальнейшей тематической обработки данных ДЗЗ для решения задач картографирования лесов и других типов растительного покрова. Приведенное на рис. 3.10 сравнение фрагментов разносезонных композитных изображений, полученных до топографической нормализации и после ее проведения, наглядно демонстрирует снижение влияния рельефа местности на измеренные спектрально-отражательные характеристики земного покрова.

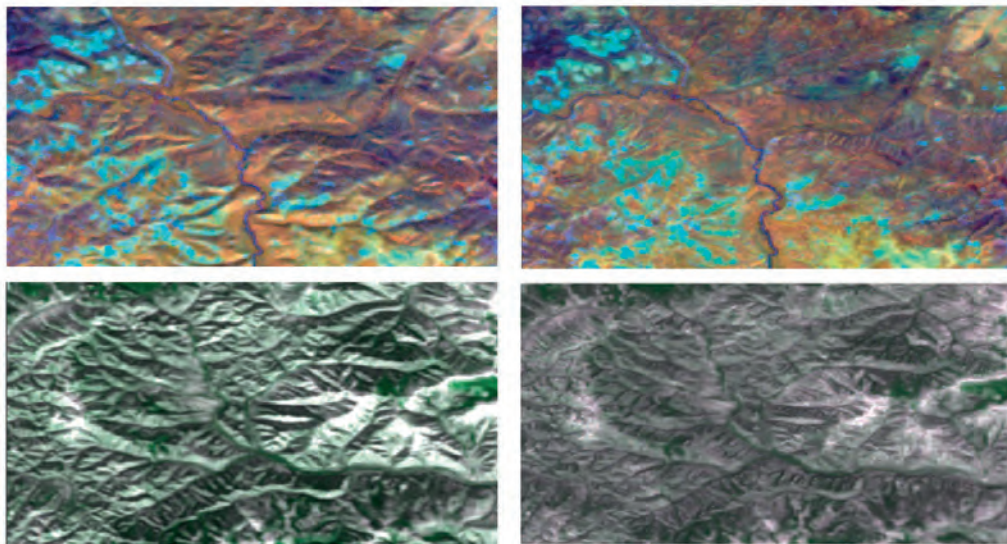


Рис. 3.10. Примеры фрагментов летних (вверху R: 0,837 мкм; G: 1,603 мкм; B: 0,655 мкм) и зимних (внизу R: 0,655 мкм; G: 0,837 мкм; B: 0,655 мкм) композитных изображений КСЯ до (слева) и после (справа) топографической нормализации

3.3. Реконструкция временных рядов данных ДЗЗ

Задача коррекции результатов измерений и восстановления пропусков во временных рядах спутниковых данных ДЗЗ неизбежно возникает при использовании оптических съемочных систем ввиду необходимости компенсации влияния облачности и дымки, аэрозолей и аппаратных шумов. Решение этой задачи часто сопряжено с использованием статистических методов оценки и прогнозирования временной динамики спектрально-отражательных характеристик земного покрова на основе свободных от влияния упомянутых выше мешающих факторов данных, предварительно отобранных по некоторой совокупности критериев. Долгое время, ввиду ограничений вычислительных ресурсов, при решении такого рода задач применялись относительно простые, основанные на использовании скользящих временных окон, статистические фильтры, такие как скользящее среднее или медиана, фильтр Савицкого-Голая (Savitzky, Golay, 1964). С ростом доступных вычислительных ресурсов в последние годы все большее развитие получают методы реконструкции временных рядов данных, основанные на использовании локальной регрессии – LOESS и LOWESS (Cleveland, 1981).

Разработанный с использованием метода LOESS алгоритм скользящей оконной аппроксимации на основе полиномов второй степени (Плотников и др., 2014) позволяет при реконструкции временных рядов спутниковых данных ДЗЗ одновременно решать задачи коррекции искаженных и заполнения пропущенных измерений. Разработанный метод обеспечивает исключение зашумленных и заполнение

пропущенных значений на основе алгоритма оконной аппроксимации локальной серии данных спутниковых измерений полиномами второй степени вида $f(t) = at^2 + bt + c$, где $f(t)$ – значение локальной оценки некоторой спектрально-отражательной характеристики земной поверхности в момент времени t ; a , b и c – коэффициенты полинома. Алгоритм предусматривает использование скользящего вдоль оси времени окна, включающего некоторое фиксированное число значащих измерений для вычисления коэффициентов полинома. Поиск значений коэффициентов выполняется методом оптимизации Нелдера-Мида (метод деформируемого многогранника) (Nelder, Mead, 1965). Полином второй степени обеспечивает достаточно хорошую локальную аппроксимацию фенологической (сезонной) динамики значений спектрально-отражательных характеристик растительности, являясь относительно простым с вычислительной точки зрения и одновременно обладая ненулевой выпуклостью, что позволяет в рамках данного подхода адекватно описывать экстремумы и точки перегиба кривой. Коэффициенты полинома рассчитываются на основе значений внутри локального временного окна переменной длины, выбираемой в общем случае таким образом, чтобы обеспечить включение в него фиксированного числа значащих измерений. Используя такой подход, можно показать (см. рис. 3.11), что данные искаженных измерений могут заметно отличаться от соответствующих им значений локальных аппроксимирующих функций за счет корректирующего влияния свободных от шумов данных. Кроме этого, коррекция приближает статистическое распределение значений к нормальному виду.

Пусть имеется исходный временной ряд данных спутниковых наблюдений $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, состоящий из n (включая зашумленные) измерений y_i , полученных в соответствующие моменты времени t_i . Измерение, полученное в момент времени t , обозначим $Y(t)$. Для построения локальных полиномов пусть выбрано скользящее локальное окно длиной p . Таким образом, входящие в окно локализации с началом на k -ом элементе из ряда Y элементы можно обозначить $Y_k = \{y_k, y_{k+1}, \dots, y_{k+p-1}\}$. Принцип работы алгоритма заключается в создании для каждого k -го измерения временного ряда множества оценок A_k , используемых для установления его валидности. Скользящее окно длиной p включает в себя каждый элемент исходного временного ряда Y не более p раз. Таким образом, каждый элемент ряда Y получает не более p оценок на основе всех проходящих через него локальных функций $f_k(t)$. Более наглядно распределение оценок для каждого элемента исходного временного ряда можно представить в виде матрицы M , в которой строки соответствуют значениям оценок элементов Y , а столбцы – различным оценкам одного элемента:

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1p} \\ & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2p} \\ & & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3p} \\ & & & & & \dots & \\ & & & & & & a_{n1} & \dots & a_{np} \end{pmatrix}.$$

Таким образом, k -ый элемент временного ряда получит в общем случае (когда $k \geq p$ и $k \leq n - p$) множество оценок $A_k = \{a_{(k-m)m}\}$, $m = 1, \dots, p$ мощностью p . Учёт краевых эффектов происходит за счет экстраполяции полиномов $f_k(t)$ при $k \geq p$ и $k \leq n - p$ за пределы окна локализации.

Работу алгоритма реконструкции данных ДЗЗ можно представить в виде следующих шагов.

После расчета p различных оценок, заполняющих множество A_k , для текущего элемента временного ряда данных вычисляется среднее значение \bar{y}_k и дисперсия σ_k этих оценок. Процесс получения восстановленной оценки значения текущего элемента можно разделить на два этапа. На первом этапе проводится классификация всех элементов временного ряда данных на следующие три группы:

- искаженные измерения;
- вероятно искаженные измерения;
- неискаженные измерения.

Отнесение элементов временного ряда данных $Y(t_k)$ к категории искаженных измерений предполагает совместное удовлетворение условиям:

$$|Y(t_k) - \bar{y}_k| > 2\sigma_k, \quad \frac{\sigma_k}{\bar{y}_k} > 0,05 \quad (3.10)$$

или выполнения только условия:

$$\frac{\sigma_k}{\bar{y}_k} > 1. \quad (3.11)$$

При совместном соблюдении условий:

$$|Y(t_k) - \bar{y}_k| > 2\sigma_k, \quad \frac{\sigma_k}{\bar{y}_k} < 0,05 \quad (3.12)$$

элемент $Y(t_k)$ относится к категории вероятно искаженных. В случае невыполнения ни одного из вышеуказанных условий элемент временного ряда данных ДЗЗ считается неискаженным и остается неизменным. Искаженные измерения исключаются из временного ряда данных серии, а вероятно искаженные на финальной стадии заменяются их средней оценкой: $Y(t_k) = \bar{y}_k$.

На втором этапе производится оконная полиномиальная аппроксимация очищенного от искаженных значений временного ряда данных. Первый этап при необходимости может итеративно повторяться с заданным числом итераций.

Пропущенные значения исходного временного ряда данных также заменяются их средними оценками, полученными на основе локальных полиномов, рассчитанных для лежащих в их окрестности окон. Для соответствия подобранным пороговым значениям перед расчетом локальных полиномов исходный временной ряд модифицируется линейным преобразованием так, чтобы измерения входили в диапазон значений от 0 до 10000. Все относительные и абсолютные пороги, указанные в используемых алгоритмом критериях, применимы только для модифицированного временного ряда. На последнем этапе алгоритма к восстановленному временному ряду данных ДЗЗ применяется обратное преобразование.

Пример совокупности локальных полиномов на отрезке исходного временного ряда значений перпендикулярного вегетационного индекса PVI, полученных по данным MODIS, представлен на *рис. 3.11*.

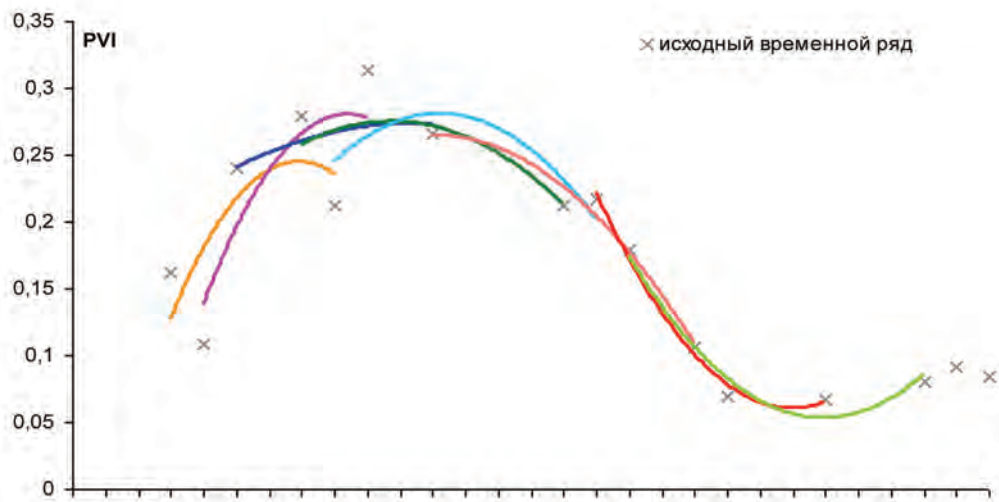


Рис. 3.11. Пример полиномиальной аппроксимации внутреннего отрезка зашумленного временного ряда PVI, включающего пропущенные измерения, при ширине окна $p = 5$. Полиномы, полученные при различных положениях скользящего окна, показаны разными цветами

Пример временных рядов исходных и восстановленных значений PVI с помощью метода скользящей оконной аппроксимации при ширине окна локализации $p = 5$ приведен на *рис. 3.12*.

К преимуществам использования алгоритмов восстановления и коррекции пропущенных значений можно отнести также и обеспечиваемое ими повышение пространственной четкости обработанных изображений. Этот эффект объясняется коррекцией в процессе сглаживания временной серии зашумленных измерений, сделанных под влиянием облачности и теней. Метод может применяться не только к вегетационным индексам, но и к временным рядам дистанционных измерений среднего (*рис. 3.13*) и высокого (*рис. 3.14*) пространственного разрешения.

С практической точки зрения методы восстановления временных серий для объектов наземных экосистем могут применяться как в случае наличия сезонного набора данных — от начала вегетации до её окончания, так и в случае неполного набора — от начала вегетации до произвольного момента времени внутри сезона вегетации. В первом случае метод скользящего окна позволяет накопить достаточно статистики для оценки качества любого измерения внутри вегетационного сезона, в то время как во втором случае необходимо учитывать краевой эффект, возникающий возле последнего измерения внутри сезона вегетации. В этом практически более используемом случае компенсация нехватки статистики обеспечивается увеличением или сдвигом окна локализации.

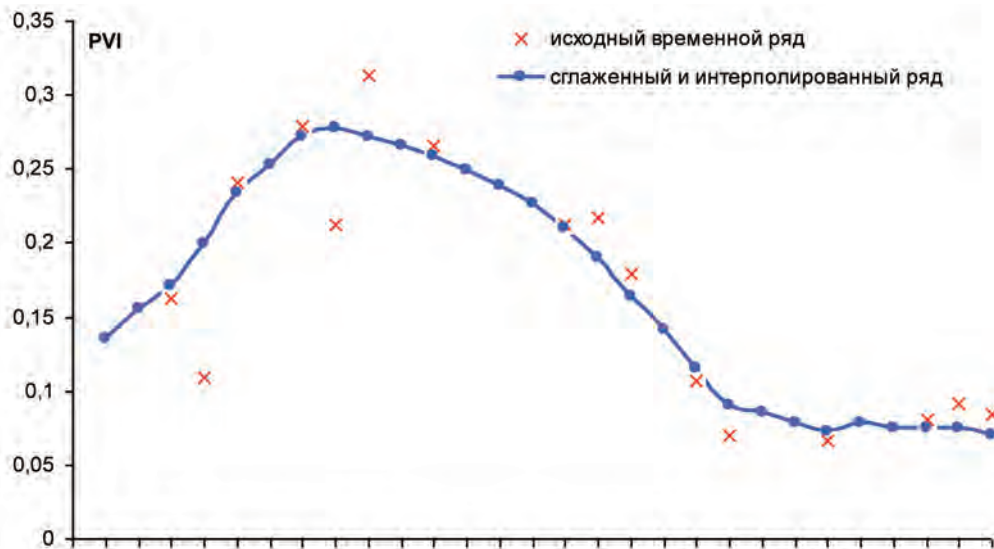


Рис. 3.12. Пример сглаживания и заполнения пропущенных значений временного ряда PVI методом полиномиальной аппроксимации

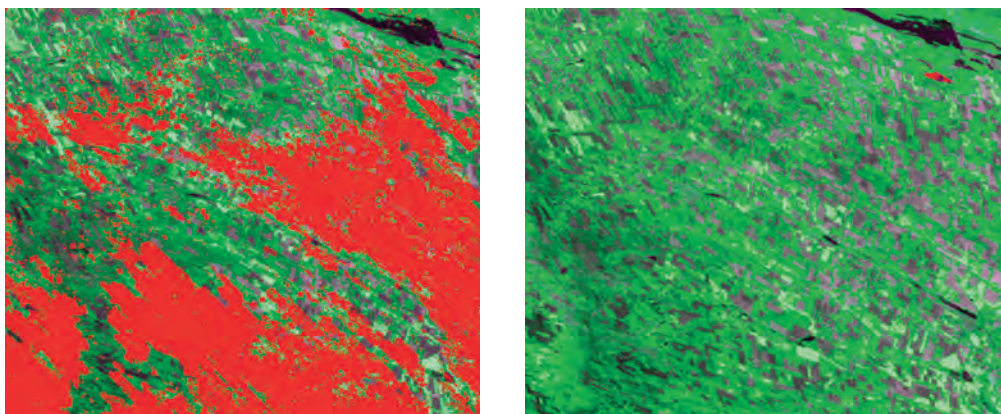


Рис. 3.13. Пример восстановления пропущенных измерений (показаны красным) в двухканальном (псевдоцвета R: красный канал; G: ближний ИК канал; B: синий канал) композитном изображении КСЯ по данным MODIS (Terra) за 1 мая 2015 года на территорию с неоднородным ландшафтом, каждый канал восстанавливался независимо

Получаемые в результате работы описанного алгоритма скорректированные временные ряды спутниковых данных широко используются для распознавания типов и оценки состояния сельскохозяйственной растительности (Плотников и др., 2010, 2011), оценки последствий пожаров (Стыценко и др., 2013), а также включены в состав информационного сервиса спутникового мониторинга растительного покрова «Вега» (Лупян и др., 2011б).

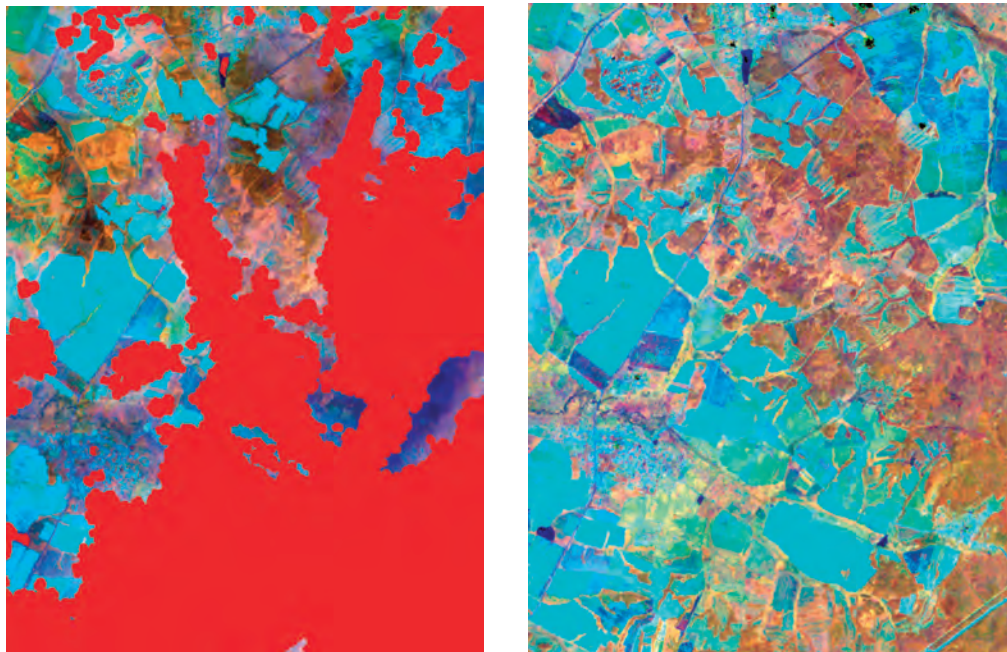


Рис. 3.14. Пример восстановления пропущенных измерений (показаны красным) изображения КСЯ по данным Landsat на часть территории Приморского края за 6 июля 2015 года (псевдо-цвета R: ближний ИК канал; G: средний ИК канал; B: красный канал), каждый канал Landsat восстанавливался независимо

Глава 4

Оценка современного состояния и динамики растительного покрова России на основе методов спутникового картографирования и прогнозного моделирования

4.1. Метод локально-адаптивной классификации и оценки характеристик растительного покрова

Взаимосвязи характеристик растительного покрова и данных дистанционных измерений часто носят локальный характер, и, будучи найденными для одного региона, могут давать неадекватные результаты при их применении для других регионов (Woodcock et al., 2001; Foody et al., 2003; Барталев и др., 2011а). Эта особенность, вызванная во многом пространственной изменчивостью спектрально-отражательных характеристик растительного покрова, затрудняет создание методов его спутникового картографирования, применимых для больших территорий.

Проблема пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик растительного покрова может быть решена несколькими методами. Один из путей ее решения предполагает стратификацию картографируемой территории. В соответствии с этим подходом вся территория разбивается на регионы, в каждом из которых независимо решается задача оценивания. Границы регионов выбираются таким образом, чтобы минимизировать в пределах каждого из них пространственную изменчивость спектрально-отражательных характеристик идентичных типов растительного покрова (Bartholome, Belward, 2005). К числу недостатков данного подхода относится необходимость участия эксперта в процессе стратификации территории, который в силу требуемого учета комплекса слабо формализованных факторов, как правило, не поддается автоматизации. При этом получаемые оценки параметров растительности по данным ДЗЗ могут испытывать резкие изменения на границах между регионами, что, в свою очередь, может требовать дополнительного учета при выборе методов и параметров классификации спутниковых данных для отдельных регионов.

Альтернативное решение проблемы может основываться на использовании методов, позволяющих учесть пространственную изменчивость характеристик спектрального отражения растительного покрова. Например, современные методы классификации с обучением (деревья решений, нейронные сети, опорные вектора) могут учесть изменчивость свойств класса в случае, если обучающая выборка является репрезентативной и полностью учитывает вариации значений признаков распознавания. Методы классификации без обучения также способны отчасти учесть пространственную изменчивость спектрально-отражательных характеристик на основе гиперкластеризации данных ДЗЗ, т.е. создания множества спектральных кластеров, значительно превышающего число распознаваемых семантических классов. При таком подходе представители одного класса с разными характеристиками спектрального отражения могут быть отнесены к различным кластерам с последующим их объединением. Но такие подходы неэффективны в случае, если разные классы, находящиеся в удаленных друг от друга регионах, имеют схожие спектрально-отражательные характеристики.

Наиболее естественным решением проблемы пространственной изменчивости является локализация данных, используемых для оценки характеристик растительности. Такой подход предполагает построение локальной зависимости характеристик растительного покрова от данных дистанционных измерений, применимой только для небольшой области. Разделение всей исследуемой территории на такие области и построение зависимостей для каждой из них с использованием локально доступной информации позволяет решить проблему пространственной изменчивости. Но применение такого метода может быть ограничено требованием достаточного объема информации для построения локальных зависимостей в каждой из областей.

Метод LAGMA (locally adaptive global mapping algorithm) (Уваров, Барталев, 2010; Bartalev et al., 2014) позволяет решить проблему пространственной изменчивостью посредством локализации обучающей выборки. Для формального описания метода LAGMA сформулируем проблему определения характеристик растительности по спутниковым данным в общем виде. Введем n -мерное пространство параметров, полученных по данным ДЗЗ: $F = \{(f_1, f_2, \dots, f_n)\}$, где $f_i, i = 1, \dots, n$ – значения отдельных параметров. Существует некоторая подлежащая дистанционной оценке характеристика C , которая может быть непрерывной или дискретной, например, обозначать параметры растительного покрова (LAI , NPP , биомасса) или его типы. Также существует неизвестная функция $A : F \rightarrow C$, которая задает отношение между множеством параметров и возможными значениями характеристики. Предположим, что для некоторого подмножества пространства параметров (обучающей выборки) $F_T \in F$ известны соответствующие им значения характеристики, что можно выразить следующим соотношением: $KNOWN : F_T \rightarrow C$. Также предположим, что существует некоторый метод, позволяющий на основании знаний об известных значениях характеристик и значениях параметров построить приближение к реальной функции $A : F \rightarrow C$. Обозначим этот метод $TRAIN : \{F\} \times \{KNOWN\} \rightarrow \{\tilde{A}\}$. Функция $TRAIN$ зависит от решаемой задачи. Например, при решении задачи классификации $TRAIN$ представляет собой процесс построения классификатора по обучающей выборке. В случае если C является непрерывной величиной, то метод $TRAIN$ может состоять в построении регрессии по известным зависимостям

между спутниковыми параметрами и характеристикой. В случае если $KNOWN: F_T \rightarrow C$ является системой локализованных отношений (например, выработанных на разных тестовых участках) и эти отношения можно расширить на все пространство спутниковых параметров, то \tilde{A} может состоять в осреднении значений, даваемых каждой зависимостью (возможно, взвешенных по расстоянию от тестовых участков до исследуемой территории).

Основная идея метода LAGMA – создание локальной приближенной функции \tilde{A}_L , применяемой к некоторой области и построенной по части подмножества F_T , пространственно близкой к этой области. Для того чтобы часть подмножества F_T , используемая для построения \tilde{A}_L , могла репрезентативно представлять весь диапазон характеристик C , этот диапазон можно представить как сумму диапазонов:

$$C = \bigcup_{i=1, \dots, k} c_i . \quad (4.1)$$

Например, в задаче классификации набор $\{c_i\}$ может быть интерпретирован как отдельные классы. Разбиение зависит от задачи и в отдельных задачах может не производиться.

В LAGMA все точки пространства $X = \{\mathbf{x}\} = \{(x_1, x_2)\}$, находящиеся в области интереса, связаны с их вектором значений в пространстве спутниковых параметров. Это отношение для удобства может быть представлено в виде отображения $SPAT : X \rightarrow F$. Для определенной группы точек пространства X_T (обучающей выборки) известны их значения характеристик $KNOWN' : X_T \rightarrow C$, где $KNOWN' = KNOWN(SPAT(\mathbf{x}))$. Для диапазона значений характеристики c_i локальная обучающая выборка для точки \mathbf{x} может быть представлена как $X_{T,L}(R_i(\mathbf{x}), \mathbf{x}, c_i) = \{\mathbf{x}' \in X_T : d(\mathbf{x}', \mathbf{x}) < R_i(\mathbf{x}), KNOWN'(\mathbf{x}') \in c_i\}$, где $d(\mathbf{x}', \mathbf{x})$ – это расстояние между двумя точками \mathbf{x} и \mathbf{x}' в пространстве, то есть $X_{T,L}(R_i(\mathbf{x}), \mathbf{x}, c_i)$ – это все точки обучающей выборки, значения характеристик которых лежат в диапазоне c_i , и удаленные не более чем на $R_i(\mathbf{x})$ от точки \mathbf{x} . Вся обучающая выборка в точке \mathbf{x} может быть представлена как:

$$X_{T,L}(\mathbf{R}(\mathbf{x}), \mathbf{x}) = \bigcup_{i=1, \dots, k} X_{T,L}(R_i(\mathbf{x}), \mathbf{x}, c_i) , \quad (4.2)$$

где $\mathbf{R}(\mathbf{x}) = (R_1(\mathbf{x}), R_2(\mathbf{x}), \dots, R_k(\mathbf{x}))$ – вектор радиусов агрегации для всех диапазонов c_i . Таким образом, для каждой точки пространства метод LAGMA создает локальную обучающую подвыборку $X_{T,L}(\mathbf{R}(\mathbf{x}), \mathbf{x})$ и по ее представлению в пространстве спутниковых параметров $F_{T,L}(\mathbf{x}) = SPAT(X_{T,L}(\mathbf{R}(\mathbf{x}), \mathbf{x}))$ и значениям ее характеристик строит локальную приближенную функцию зависимости между спутниковыми параметрами и характеристикой в данной точке – $\tilde{A}_L(\mathbf{x}) = TRAIN(F_{T,L}(\mathbf{x}), KNOWN)$. Далее, значение исследуемой характеристики для данной точки определяется с помощью этого отображения по спутниковым данным.

Радиусы агрегации для каждой точки можно подсчитать по формуле:

$$R_i(\mathbf{x}) = \min_{R_{\min} \leq R < R_{\max} \mid |X_{T,L}(R, \mathbf{x}, c_i)| \geq N_{\min}} (R) . \quad (4.3)$$

В соответствии с этим уравнением, $R_i(\mathbf{x})$ – это наименьший радиус, удовлетворяющий следующим ограничениям: R_{\max} – максимально возможный радиус агрегации, R_{\min} – минимально допустимый радиус агрегации и N_{\min} – минимальное число элементов выборки из диапазона c_i в локальной обучающей выборке. Значения R_{\max} , R_{\min} и N_{\min} устанавливаются пользователем. Если не существует значения R , удовлетворяющего этим ограничениям, то $R_i(\mathbf{x}) = 0$.

При практическом применении данного подхода необходимо учитывать его вычислительную эффективность. Так как для отдельных методов построение локального приближения в каждой точке трудоемко с вычислительной точки зрения, то применяется менее ресурсоемкий вариант метода. В соответствии с ним обучающая выборка собирается не в каждой клетке, а в определенных областях $G(R_g, \mathbf{x}) = \{\mathbf{x}' \in X : d(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \leq R_g\}$, где R_g – это размер этой области. По аналогии можно обозначить обучающую выборку в этой области как $G_T(R_g, \mathbf{x}) = \{\mathbf{x}' \in X_T : d(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \leq R_g\}$. Было использовано следующее расстояние между точками пространства:

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \max_{i=1,2} (|x_i - x'_i|) \quad (4.4)$$

– максимум расстояния по всем (двум) изменениям, то есть $G(R_g, \mathbf{x}) = \{\mathbf{x}' : d(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \leq R_g\}$ – это квадрат со стороной $2R_g$ и с центром в \mathbf{x} . Таким образом, можно построить регулярную сетку, в которой все клетки имеют одинаковый размер $2R_g$ и могут быть проиндексированы целочисленной парой значений $\chi = (\chi_1, \chi_2)$ по их позиции в сетке. Тогда обучающая выборка в каждой клетке может быть обозначена как $G(\chi)$ и $G(\chi, c_i) = \{\mathbf{x} \in G(\chi) : \text{KNOWN}(\mathbf{x}) = c_i\}$ (R_g был исключен из списка аргументов, так как он постоянен для всей сетки). В соответствии с методом LAGMA все точки в клетке имеют одну и ту же обучающую выборку, которую можно обозначить как:

$$G_{T,L}(R_i(\chi), \chi, c_i) = \bigcup_{\chi': d(\chi', \chi) < R_i(\chi)} G(\chi', c_i), \quad (4.5a)$$

$$G_{T,L}(R(\chi'), \chi') = \bigcup_{i=1, \dots, k} G_{T,L}(R_i(\chi'), \chi', c_i), \quad (4.5b)$$

где расстояние вычисляется как и ранее:

$$d(\chi, \chi') = \max_{i=1,2} (|\chi_i - \chi'_i|), \quad (4.5в)$$

$R(\chi)$ определяются аналогично общему случаю. Локальная для клетки приближенная функция \tilde{A}_L может быть построена как и в общем случае: $F_{T,L}(\chi') = \text{SPAT}(G_{T,L}(R(\chi'), \chi'))$, $\tilde{A}_L(\chi') = \text{TRAIN}(F_{T,L}(\chi'), \text{KNOWN})$. Такое локальное приближение может быть построено для каждой клетки сетки и использовано для определения значений характеристик всех точек, находящихся внутри клетки, по значениям их дистанционно измеренных параметров.

Такая реализация алгоритма LAGMA позволяет достаточно быстро обрабатывать большие изображения и дает пользователю контроль над параметрами, управляющими скоростью обработки и точностью получаемых результатов (N_{\min} , R_{\max} , R_{\min} , R_g). При технической реализации метода LAGMA для задачи картографирования его выполнение может быть разбито на несколько этапов (рис. 4.1).

На первом этапе исследуемая область делится на клетки одинакового размера. Размеры клеток и их количество определяются с учетом особенностей задачи, исследуемых характеристик земного покрова и плотности обучающей выборки.

На втором этапе работы алгоритма обучающая выборка в данной клетке дополняется обучающими выборками из ближайших соседних клеток (расположенных в квадратной области с центром в текущей клетке) так, чтобы размер итоговой выборки стал достаточен для построения классификатора. Классы, для которых размер обучающей выборки недостаточен, не включаются в обработку для данной клетки. Затем в каждой клетке, на основании собранной с соседних клеток обучающей выборки достаточно большого размера можно построить локальный классификатор для оценки типа земного покрова по данным ДЗЗ.

На третьем, последнем этапе с помощью локального для клетки классификатора по спутниковым параметрам можно определить классы для точек в данной клетке.

Также LAGMA может использоваться для оценки характеристик растительности на основе регрессионного анализа. Регрессионный анализ позволяет описывать зависимость характеристик растительности от параметров, полученных по спутниковым данным. Эта зависимость также может изменяться в пространстве (обладать пространственной изменчивостью), что делает актуальным применение метода LAGMA. В соответствии с ним регрессионная зависимость строится для каждой клетки на основе значений характеристик и параметров, собранных в локальной окрестности клетки. Затем полученные зависимости могут использоваться для восстановления неизвестных характеристик по значениям параметров ДЗЗ в соответствующих точках. Также этот подход может использоваться для увеличения пространственного разрешения карт характеристик растительности.

Стоит отметить, что кроме решения проблемы пространственной изменчивости, LAGMA также позволяет уменьшить размер обучающей выборки, используемый в каждой области (клетке). Для многих методов классификации скорость построения классификатора нелинейно возрастает по мере увеличения размера выборки, поэтому LAGMA потенциально может уменьшить время картографирования этими методами. Также использование меньшей по объему выборки может уменьшить объем хранимых в памяти компьютера данных. С другой стороны, построение зависимости между характеристиками растительности и спутниковыми параметрами в LAGMA должно быть проведено для множества клеток, что может привести к снижению скорости работы.

Метод LAGMA реализован в виде программного комплекса LAGMA-PLUS. Данный программный комплекс обеспечивает возможность решения задачи картографирования и оценивания характеристик растительного покрова больших территорий на основе быстрой многопоточной классификации и использования параметрических и непараметрических методов.

Текущая версия программного обеспечения LAGMA-PLUS написана на языке C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio 2010. Программа реализована в виде приложения для командной строки для операционной системы Windows (Windows XP и старше). Программа принимает на вход обучающую выборку и признаки распознавания в виде растровых изображений одного размера и одной проекции, и на выходе выдает результат классификации в виде растрового изображения.

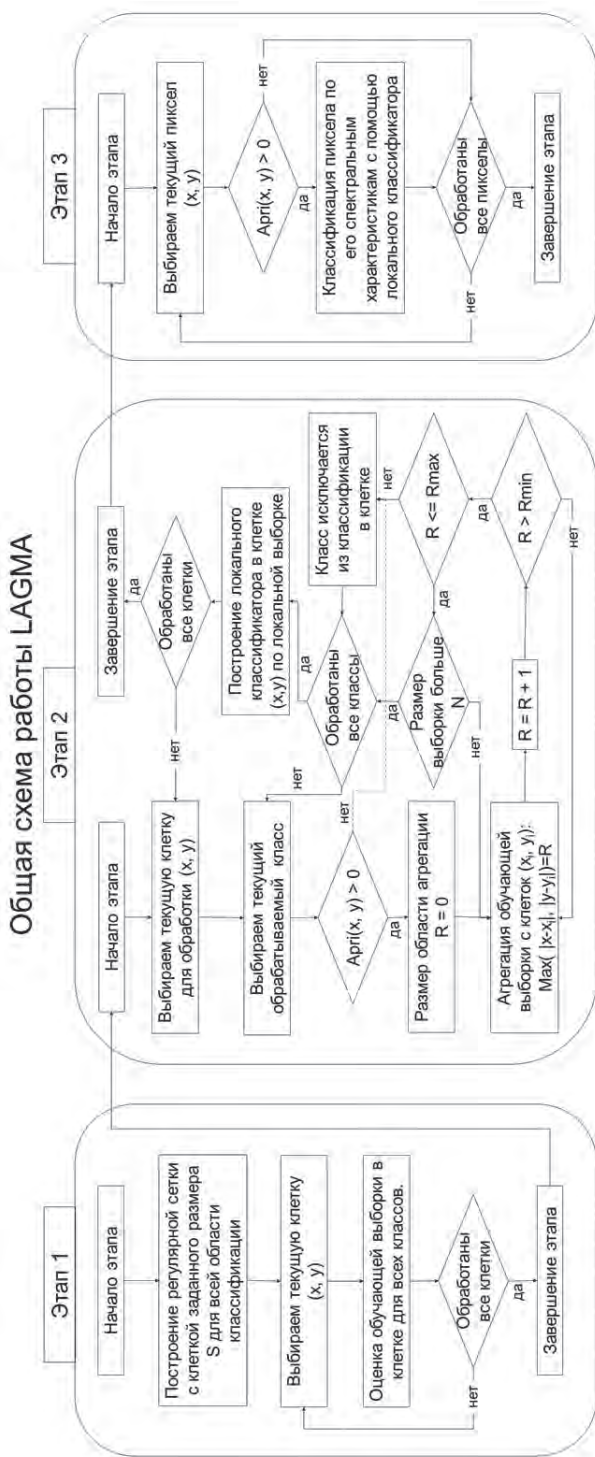


Рис. 4.1. Логическая схема применения метода LAGMA при классификации данных ДЗЗ

LAGMA-PLUS предлагает пользователю два метода классификации – метод максимального правдоподобия и метод случайных лесов. Программа позволяет изменять параметры метода классификации (например, число деревьев, глубина дерева, число элементов в конечном узле для метода случайных лесов). На выходе программа может выдать вспомогательную информацию о результатах классификации – средние значения признаков распознавания и ковариации классов для метода максимального правдоподобия, число проголосовавших деревьев и ошибку out-of-bag для метода случайных лесов.

Программа дает возможность пользователю настроить все параметры метода LAGMA – размер клеток, ограничение на число элементов в клетке и радиус агрегации. Настройки программы передаются через аргументы командной строки или через отдельный файл настроек. Также пользователь может задать АОИ (область обработки), в которой будет выполняться классификация спутниковых данных. LAGMA-PLUS также предоставляет опции контроля объема памяти, выделяемого на хранение загружаемых спутниковых изображений.

Программа позволяет задать априорные вероятности классов в любой точке изображения (в виде растровых изображений на входе программы). По априорным вероятностям для каждого класса строятся коэффициенты вида $e^{apri/25} - 1$ (где $apri$ – значение априорной вероятности от 0 до 255), которые модифицируют вывод классификатора для каждого класса (функцию правдоподобия для метода максимального правдоподобия, долю проголосовавших деревьев для метода случайных лесов). Таким образом, пользователь может скорректировать результат классификации с учетом априорной информации о пространственном распределении различных типов растительного покрова, в том числе ограничивая возможность выхода типа растительности за пределы его ареала произрастания.

Для увеличения скорости построения классификаторов методом максимального правдоподобия программа использует тот факт, что два классификатора, построенные по двум несовпадающим выборкам этим методом, можно просуммировать для получения классификатора, построенного по объединению этих выборок (аналогичное утверждение верно и для разности). Таким образом, программа может строить только локальные классификаторы в каждой клетке, заменяя агрегацию выборки агрегацией локальных классификаторов. При этом итоговый классификатор одной клетки может быть построен по итоговому классификатору соседней клетки с добавлением и исключением локальных классификаторов части граничных клеток. Аналогичный подход скользящего окна применяется и при построении обучающей выборки для метода случайных лесов.

Программа может строить регрессионные зависимости между заданными пользователем входными характеристиками. Эти зависимости могут быть построены по заданной маске классов для произвольных входных параметров. На выходе программа выдает значения коэффициентов регрессии и детерминации между признаками для каждой клетки регулярной сетки в виде растрового изображения. На основе построенной регрессии программа может восстановить значения зависимого признака по значениям независимого признака.

LAGMA-PLUS позволяет работать с изображениями с помощью библиотеки GDAL. Библиотека GDAL реализует единый интерфейс доступа к файлам растрового и векторного форматов, доступный на многих языках программирования

(C++, Python, Perl, Ruby и др.). GDAL предоставляет возможность доступа к более чем 120 растровым и 60 векторным форматам, которые могут быть использованы и в LAGMA-PLUS.

LAGMA-PLUS поддерживает возможность многопоточного выполнения. Задача классификации разделяется между различными потоками естественным образом – каждый поток обрабатывает разный набор клеток. Один поток собирает локальную выборку для клетки, строит по ней классификатор и с помощью него определяет класс каждого пикселя в клетке. В таком варианте введения многопоточности разные потоки взаимодействуют с общими ресурсами только при чтении/записи файлов изображений. Для исключения состояния «гонки», когда результат выполнения программы зависит от порядка выполнения потоков, должны быть выполнены несколько контрольных условий. Во-первых, потоки не могут записывать информацию в один и тот же пиксель одновременно, что не является проблемой в задаче классификации, так как при обработке пикселя нужно лишь только осуществить запись результата классификации, причем для каждого пикселя эта операция выполняется однократно. Во-вторых, чтение и запись файлов должны быть синхронизированы между потоками. Для этого в программу был добавлен дополнительный уровень между интерфейсом изображений и физическими файлами (загрузчик), который выполняется в отдельном потоке и получает запросы на загрузку данных из программного интерфейса. Только загрузчик имеет право загружать данные из файлов и помещать их во временное хранилище, доступ к которому на чтение и запись открыт для всех остальных потоков. Дополнительно в загрузчике присутствует модуль, позволяющий ему осуществлять предварительную загрузку данных, которые могут потребоваться в последующие моменты времени, и выгружать уже не нужные данные при отсутствии актуальных запросов из других потоков.

Программный комплекс LAGMA-PLUS позволил провести оценку эффективности метода LAGMA для решения задачи классификации больших территорий (Bartalev et al., 2014). Эксперимент состоял в классификации всей территории России разными методами на основе данных спутникового инструмента SPOT-VEGETATION, полученных в 2000 году. Целью эксперимента было сравнение результатов классификации глобальным и локально-адаптивным методом с выбранной в качестве эталона картой земного покрова, полученной в рамках проекта GLC2000 (Bartalev et al., 2003).

Классификация осуществлялась на основе данных S10 SPOT-VEGETATION, предварительно обработанных для исключения влияния облаков, теней от них и снежного покрова (Bartalev et al., 2003). Продукты S10 использовались для построения весенних (март–май), летних (июнь–август) и осенних (сентябрь–ноябрь) композитов посредством осреднения значений пикселей в красном, ближнем ИК и среднем ИК каналах на каждом временном интервале.

Классифицируемые типы земного покрова основывались на легенде карты GLC2000. Некоторые классы были исключены или объединены с учетом их потенциальной делимости при использовании только сезонных композитов. Выборка состояла из пикселей, для которых карта GLC2000 и карта лесов СССР (масштаб 1:2500000, ред. Гарсия, 1990) показывали совпадающий тип растительного покрова. Из выборки исключались граничные пиксели между областями разных классов. Итоговая выборка была разделена на обучающую и контрольную выборки.

Обучающая выборка и данные S10 SPOT-VEGETATION использовались для классификации с использованием локально-адаптивного (LAGMA-PLUS) и глобального (ERDAS Imagine 9.1) подхода классификации методом максимального правдоподобия. LAGMA-PLUS использовался для картографирования 10 различных классов со следующими настройками: размер клетки – 23 км, максимальный радиус агрегации – 2300 км, минимальный – 0 км, минимальный размер выборки в клетке – 625 пикселей.

Контрольная выборка использовалась для оценки точности результатов классификации двумя методами и построения матриц ошибок, представленных в *табл. 4.1*. Из нее видно, что метод LAGMA показал более высокую точность классификации для всех типов земного покрова. Общий высокий уровень точности может объясняться использованием только «чистых», не смешанных пикселей при формировании обучающей и контрольной выборок. Поэтому, полученные оценки точности не отражают реального качества классификации, но они позволяют говорить о существенном повышении точности при использовании метода LAGMA в сравнении с глобальным алгоритмом (общая точность 97% и 82% соответственно).

Визуально пример результатов картографирования разными методами представлен на *рис. 4.2* для участка территории Западной Сибири. Видно, что видовой состав лесов, представленный на карте GLC2000, точнее воспроизводится по результатам классификации методом LAGMA.

Более высокая точность метода LAGMA и его более высокое совпадение с опорной картой показывают, что он является эффективным подходом к глобальному картографированию земного покрова по данным ДЗЗ. Метод LAGMA и реализующий его комплекс LAGMA-PLUS были использованы для построения карт растительного покрова России (раздел 4.2) (Барталев и др., 2011a), карт породной структуры лесов (раздел 4.3) (Жарко и др., 2013), карты пахотных земель (раздел 4.5) (Барталев и др., 2011b; Bartalev et al., 2016). Также использование программного комплекса позволило создать карту запаса стволовой древесины в лесах России (раздел 4.4) (Ховратович и др., 2013; Жарко, Барталев, 2015).

Таким образом, метод LAGMA позволяет решить проблему пространственной изменчивости спектрально-отражательных характеристик растительного покрова при картографировании больших территорий. Дальнейшее развитие метода может быть основано на учете ряда особенностей текущей реализации локально-адаптивного подхода. Во-первых, при построении локальной выборки решение об использовании выборки некоторой удаленной области (клетки) принимается только с учетом расстояния до нее. Но расстояние не является единственным фактором, обуславливающим схожесть обучающих выборок разных областей. Например, изменение высоты над уровнем моря на 2 км может оказать большее влияние на характеристики растительности, чем смещение на 200 километров. Поэтому дальнейшее развитие метода может быть связано с доработкой критерия локальности таким образом, чтобы он учитывал не только расстояние, но и другие факторы, такие как рельеф и климат. Для этого необходимо сформулировать новое определение «расстояния», например в виде суммы расстояния в пространстве, разницы в высоте над уровнем моря и различий сезонной динамики климатических параметров для разных областей.

Таблица 4.1 Сравнение точности картографирования глобальным и локально-адаптивным методами

Контрольная выборка	Доля обучающей выборки, %	Режим картограф.	Результат картографирования										Producer Accuracy, %
			DCF	LCF	BF	LF	MF	BG	TU	GS	BS	WB	
DCF ²	6,7	Локальный	104938	1360	135	543	2907	55	5	28	4	51	95,4
		Глобальный	77451	6474	33	4656	16728	1298	87	3277	0	22	70,4
LCF	3,4	Локальный	825	51658	262	557	1197	47	2	19	39	18	94,6
		Глобальный	2947	34620	168	1830	6602	5611	112	2595	139	0	63,4
BF	9,1	Локальный	19	185	149117	401	1341	18	75	157	7	4	98,5
		Глобальный	101	675	118931	2288	10717	2043	1185	15266	110	8	78,6
LF	24,4	Локальный	636	1982	2107	392355	554	496	703	210	405	75	98,2
		Глобальный	4377	7654	3600	348146	2650	14707	7393	10292	695	9	87,1
MF	1,4	Локальный	360	255	337	125	22546	0	2	13	1	0	95,4
		Глобальный	415	352	400	152	22133	28	4	155	0	0	93,6
BG	9,6	Локальный	588	2135	545	642	40	150410	860	696	104	197	96,3
		Глобальный	1228	3369	222	6417	198	129544	6343	8057	657	182	82,9
TU	8,6	Локальный	1	4	55	1224	1	1885	136054	495	366	0	97,1
		Глобальный	1	11	434	10369	6	7347	116352	4410	1155	0	83,1
GS	24,6	Локальный	75	984	2055	1162	233	384	350	394404	3647	61	97,8
		Глобальный	400	4152	12448	10392	388	16458	5029	315809	38181	98	78,3
BS	8,8	Локальный	0	112	39	192	7	250	6747	6253	128854	931	89,9
		Глобальный	5	33	189	860	9	2720	5834	8312	124130	1293	86,6
WB	3,4	Локальный	5	20	0	10	18	322	3	22	185	52624	98,9
		Глобальный	204	1	0	0	0	1851	5	38	455	50655	95,2
User Accuracy, %		Локальный	97,7	88,0	96,4	98,8	78,2	97,8	94,0	98,0	96,4	97,5	
		Глобальный	88,9	60,4	87,2	90,4	37,2	71,3	81,7	85,8	75,0	96,9	

Число элементов выборки 3272430. Общая точность классификации: (а) локально-адаптивным методом - 96,8%; (б) глобальным - 81,8%

² Полные названия классов и расшифровка аббревиатур представлены на рис. 4.2

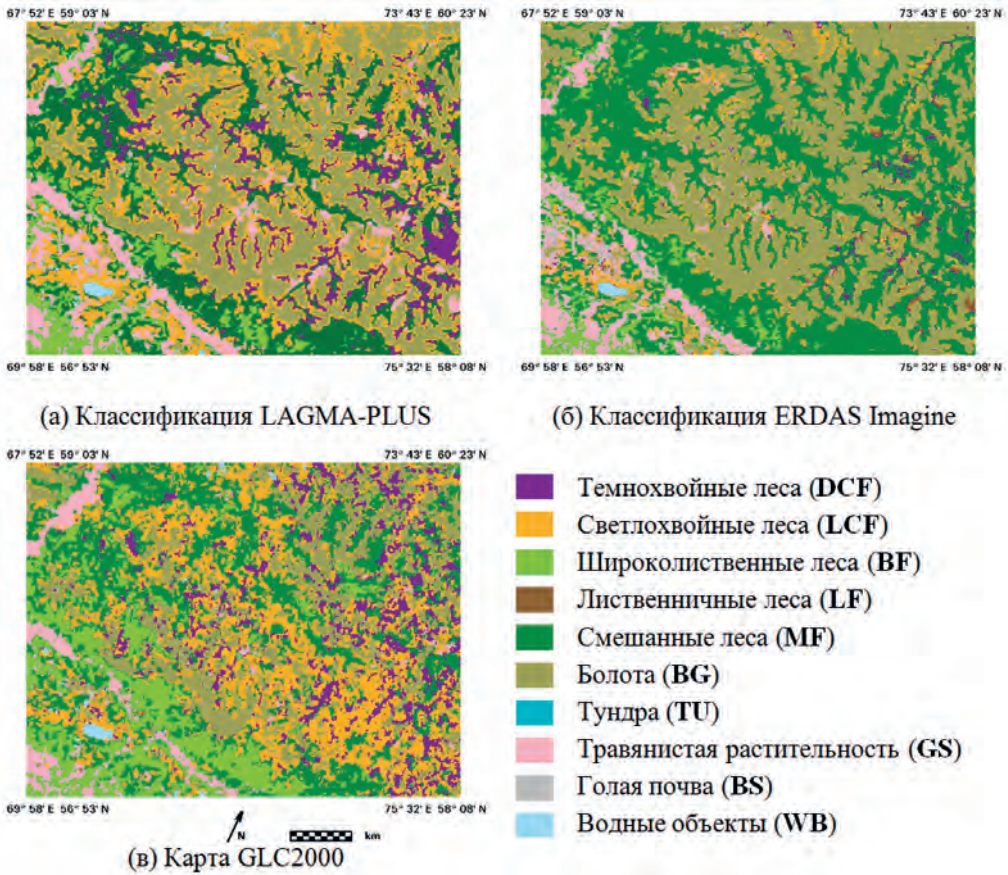


Рис. 4.2. Карты земного покрова для участка в Западной Сибири, полученные по данным SPOT-VEGETATION методами локально-адаптивной (а) и глобальной (б) классификации в сравнении с картой GLC2000 (в)

Во-вторых, стоит отметить, что в методе LAGMA разбиение всей области на клетки регулярной сетки выбрано произвольно. Положение клеток никак не зависит от локальных особенностей растительности и ее характеристик. Произвольный выбор положения границ может привести к граничным эффектам и резким переходам между разными клетками, когда части одного и того же объекта оцениваются по-разному с использованием разных обучающих выборок. Использование естественных границ между разными объектами может позволить избежать таких граничных проблем и увеличить точность оценивания характеристик растительности. Естественные границы могут быть построены, например, с помощью методов классификации без обучения, которые позволяют объединить точки со схожими характеристиками в однородные объекты. Замена клеток на такие однородные объекты может позволить решить проблему произвольности границ между различными областями. Стоит отметить, что для практической реализации данного подхода может

потребуется объединение полученного множества объектов в более крупные области, на уровне которых практически возможно выполнить сбор локальных обучающих выборок и оценку характеристик растительности за адекватное время.

4.2. Спутниковое картографирование и оценка динамики растительного покрова России

В основу разработанного метода картографирования растительного покрова положено использование спутниковых данных, получаемых спектрометрией Terra-MODIS (<http://lpdaac.usgs.gov/main.asp>). Метод предполагает использование данных ежедневных измерений КСЯ земной поверхности в красном (0,62–0,67 мкм) и ближнем ИК (0,84–0,88 мкм) каналах с пространственным разрешением 250 м (стандартный продукт MOD09). В качестве дополнительной информации используются измерения КСЯ в голубом (0,46–0,48 мкм) и среднем ИК (1,63–1,65 мкм) диапазонах с пространственным разрешением 500 м, а также угловые характеристики положения Солнца и прибора в момент наблюдения.

К числу ключевых преимуществ спектрометра MODIS при решении задач картографирования земного покрова можно отнести возможность формирования и использования временных рядов спутниковых данных. В частности, это открывает возможности разработки информативных признаков распознавания типов растительного покрова, основанных на особенностях сезонной динамики их спектрально-отражательных характеристик (Bartalev et al., 2003). Было также показано, что полученные с использованием многолетних рядов спутниковых данных признаки распознавания позволяют достоверно выделять занятые сельскохозяйственной растительностью земли (Плотников и др., 2010). Одним из этапов разработанного метода является предварительная обработка многолетней временной серии данных MODIS с целью снижения влияния мешающих факторов, таких как облака и образуемые ими тени, сезонный снежный покров и аппаратные шумы. В настоящее время для создания серии карт растительного покрова России используются данные MODIS, полученные в период 2000–2015 годов. Предварительная обработка ежедневных данных MODIS позволяет в значительной мере скомпенсировать влияние мешающих факторов и дает возможность построения композитных изображений за различные промежутки времени с редуцированным влиянием облаков, сезонного снежного покрова и аппаратных шумов. На данный момент сформированы двухмесячные композитные изображения чистой поверхности за весенний, летний и осенний период каждого из рассматриваемых лет, включающие значения КСЯ в красном, ближнем и среднем ИК каналах. Также по данным MODIS за период с 1 ноября по 31 марта следующего года сформированы зимние композитные изображения, полученные путем осреднения значений КСЯ в красном и ближнем ИК каналах для пикселей с выявленным наличием снежного покрова. Совокупность описанных выше композитных изображений позволяет достаточно хорошо описывать сезонную динамику спектрально-отражательных характеристик большинства типов земного покрова и используется при классификации в качестве признаков их распознавания.

Распознавание типов растительного покрова осуществляется с использованием совокупности полученных по данным MODIS и описанных выше признаков на основе алгоритма локально-адаптивной классификации с обучением LAGMA.

Разработанная легенда созданной карты растительного покрова России включает в себя 23 тематических класса, образующих шесть различных групп земного покрова, а именно:

1) Леса:

- *Темнохвойные вечнозеленые насаждения*, в пологе которых не менее 80% площади крон составляют теневыносливые виды хвойных деревьев, включая ель, пихту и сибирскую сосну (кедр).
- *Светлохвойные вечнозеленые насаждения*, в пологе которых не менее 80% площади крон составляют деревья сосны обыкновенной.
- *Лиственные насаждения*, в пологе которых не менее 80% площади занимают кроны березы и осины, а также широколиственных пород, включая дуб, липу, ясень, клен, вяз и некоторые другие виды.
- *Смешанные насаждения с преобладанием хвойных пород*, в которых кроны хвойных деревьев занимают от 60% до 80%, а лиственных – от 20% до 40% площади полога.
- *Смешанные насаждения*, в которых площади крон хвойных и лиственных пород деревьев представлены примерно в равных пропорциях (40–60 %) в пологе.
- *Смешанные насаждения с преобладанием лиственных пород*, в которых кроны лиственных пород деревьев занимают от 60% до 80% , а хвойных – от 20% до 40% площади полога.
- *Хвойные листопадные (лиственничные) насаждения*, в пологе которых кроны деревьев лиственницы занимают более 80% площади.
- *Редины хвойные листопадные (лиственничные)*, представляющие собой участки, занятые отдельно стоящими деревьями или разреженными насаждениями лиственницы с проектным покрытием крон менее 20%.

2) Травяно-кустарниковая растительность:

- *Луга* – травяная растительность с продолжительностью вегетационного сезона более 5 месяцев, видовой состав которой характеризуется господством многолетних трав, главным образом злаков и осоковых, в условиях достаточного увлажнения. Площадь проекции крон деревьев и кустарников на земную поверхность составляет менее 20%.
- *Степи* – травяной покров образован преимущественно засухоустойчивыми многолетними дерновинными злаками (ковыль, типчак, полынь, житняк и др.). Встречается большое разнообразие видов степных кустарников и полукустарников, а также короткоцветущих эфемероидов и эфемеров.
- *Хвойные вечнозеленые кустарники* – кустарниковые заросли или низкоствольные леса из кедрового стланика.

- *Лиственные кустарники* – сообщество низкорослых и стелющихся кустарников (кустарниковых или карликовых берез, полярных ив и др.).

3) Тундра:

- *Кустарничковая тундра* – сухая тундра с редкой фрагментарной растительностью, среди которой доминируют виды альпоарктических кустарничковых сообществ высотой менее 15 см. Распространены также мохово-лишайниковый покров и разнотравье.
- *Травянистая тундра* представлена главным образом различными видами трав и мхов, произрастающими на сырых почвах и образующими сплошной растительный покров. Часто встречаются кустарнички высотой до 40 см.
- *Кустарниковая тундра* с доминированием кустарников (карликовая береза и различные виды ивы) высотой более 40 см, иногда с примесью можжевельника, ольхи или кедрового стланика.

4) Водно-болотные комплексы:

- *Болота* – территории, характеризующиеся избыточным увлажнением с преобладанием растительного покрова из мхов, лишайников, тростника, осоки и некоторых других видов. Часто встречаются участки с наличием редкого (< 20%) древесного полога.
- *Прибрежная растительность* – гидрофильная травяная и древесно-кустарниковая растительность по берегам водоемов, часто периодически затопляемая.

5) Другие типы растительного покрова:

- *Свежие гари* – лесные гари, появившиеся в течение последних пяти лет. Могут содержать погибшие деревья и некоторое присутствие вторичной растительности.
- *Пахотные земли* – регулярно обрабатываемые в течение последних пяти лет земли сельскохозяйственного назначения.

6) Не покрытые растительностью земли:

- *Вечные снега и льды* – земли, покрытые снегами и льдами в течение всего года.
- *Открытые грунты и выходы горных пород* – земли, суммарное проективное покрытие которых растительностью всех видов не превышает 20%.
- *Урбанизированные территории* – населенные пункты, дороги и другие образования антропогенного происхождения.
- *Водные объекты* – речные и озерные внутренние водоемы, а также прибрежные участки открытой воды.

Метод локально-адаптивной классификации LAGMA предусматривает использование репрезентативной выборки обучающих данных, обеспечивающих оценку признаков распознаваемых классов на картографируемой территории. В качестве возможных источников данных для формирования обучающей выборки могут использоваться, в частности, существующие тематические карты. Однако при использовании существующих карт необходимо учитывать, что получаемая на их ос-

нове обучающая выборка, как правило, требует предварительной фильтрации в силу таких причин, как:

- возможные ошибки картографирования;
- изменения земного покрова с момента создания опорной карты;
- различия величин пространственного разрешения опорной карты и используемых спутниковых данных.

В качестве опорной карты для формирования обучающей выборки была использована карта наземных экосистем Северной Евразии, созданная на основе полученных в 2000 году спутниковых данных SPOT-VEGETATION, имеющих пространственное разрешение около 1 км (Bartalev et al., 2003). При формировании обучающей выборки был использован итерационный подход, предусматривающий ее коррекцию по результатам многократного использования процедуры классификации и экспертной оценки получаемых результатов. При этом формирование начальной обучающей выборки предусматривало несколько этапов фильтрации пикселей опорной карты с целью исключения макроскопических ошибок.

Для коррекции обучающей выборки использовался алгоритм гистограммной фильтрации. Данный алгоритм предусматривает исключение из обучающей выборки пикселей некоторого класса, по своим спектрально-отражательным характеристикам имеющих большую степень сходства с другими классами. Применение гистограммной фильтрации оправдано при условии, что большинство пикселей опорной карты не претерпело изменений и не содержит ошибок распознавания, а ошибочно распознанные пиксели в действительности принадлежат к одному из классов ближайшего окружения. В основе алгоритма лежит построение на основе обучающей выборки многомерных гистограмм значений признаков для множества классов, представленных в скользящем окне 23×23 км.

Таким образом, посредством последовательной обработки каждого года в отдельности была разработана унифицированная опорная выборка классов, не затрагивающая участки изменений растительного покрова за период 2000–2015 гг. Следует отметить, что такие классы, как пахотные земли, и повреждения экосистем пожарами являются относительно быстро меняющимися, в силу чего они не представлены в опорной выборке, а интегрированы из внешних источников (Барталев и др., 2011б; Барталев и др., 2015б). В *табл. 4.2* представлен объем опорной выборки для различных типов земного покрова. Пример карты растительного покрова России за 2015 год представлен на *рис. 4.3*

Качественное сравнение серии карт растительного покрова с содержательно близкими глобальными и региональными информационными продуктами позволяет сделать заключение о существенных преимуществах по уровню достоверности полученных данных о пространственном распределении типов растительного покрова на территории России.

Полученные результаты открывают новые возможности оценки динамики различных экосистем и, в частности, лесов. На *рис. 4.4* можно оценить изменение площади лесного покрова России с начала нынешнего столетия. Следует отметить, что в последние годы идет непрерывное сокращение площади хвойных лесов (*рис. 4.5*), частично замещаемых лиственными породами.

Таблица 4.2. Характеристика опорной выборки и оценка площади различных типов земного покрова в 2015 году

Тип растительности	Опорная выборка		Результат картографирования	
	Число пикселей (тыс. шт.)	% площади выборки от площади классов на карте	Площадь (тыс. км ²)	% общей площади
Леса				
Темнохвойные вечно-зеленые	8692,8	56,6	812,9	4,8
Светлохвойные вечно-зеленые	6812,4	34,6	1041,2	6,1
Лиственные	11085,0	42,6	1376,5	8,1
Смешанные с преобладанием хвойных	2443,0	25,7	502,0	3,0
Смешанные	1427,9	17,5	431,3	2,5
Смешанные с преобладанием хвойных	2864,4	30,3	500,2	2,9
Хвойные листопадные	18244,4	37,3	2590,7	15,3
Редины хвойные листопадные	1057,2	6,8	821,2	4,8
Общая площадь лесов	52627,1	34,5	8076	47,5
Травяно-кустарниковая растительность				
Луга	2535,6	9,8	1367,7	8,1
Степи	2498,4	38,9	339,6	2,0
Хвойные вечнозеленые кустарники	1948,4	20,8	495,4	2,9
Лиственные кустарники	190,1	3,6	282,6	1,7
Тундра				
Кустарничковая	2297,5	20,7	586,8	3,5
Травянистая	7242,0	33,4	1147,6	6,8
Кустарниковая	3339,1	19,1	925,0	5,4
Водно-болотные комплексы				
Болота	9723,3	34,1	1508,8	8,9
Прибрежная растительность	2498,4	22,8	109,0	0,6
Не покрытые растительностью земли				
Вечные снега и льды	-	-	54,5	0,3
Грунты и выходы горных пород	4848,4	38,8	660,9	3,9
Урбанизированные территории	-	-	17,3	0,1
Водные объекты	1713,6	27,1	334,9	2,0
Другие типы растительного покрова				
Свежие гари	-	-	234,9	1,4
Пахотные земли	-	-	843,3	5,0
Общая площадь			16984,3	100

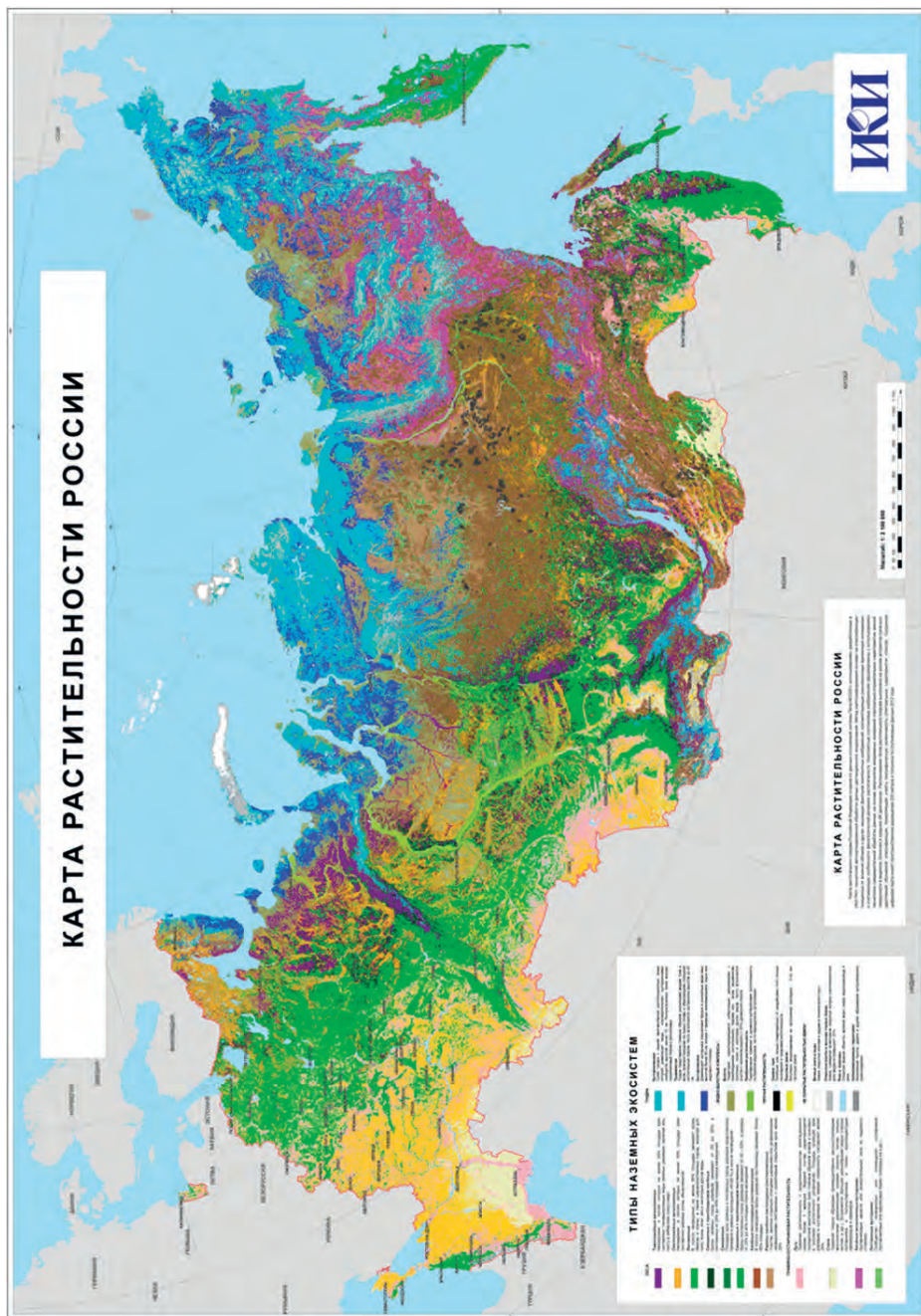


Рис 4.3. Карта растительного покрова России TerraNorte RLC, полученная по данным Terra-MODIS 2015 года

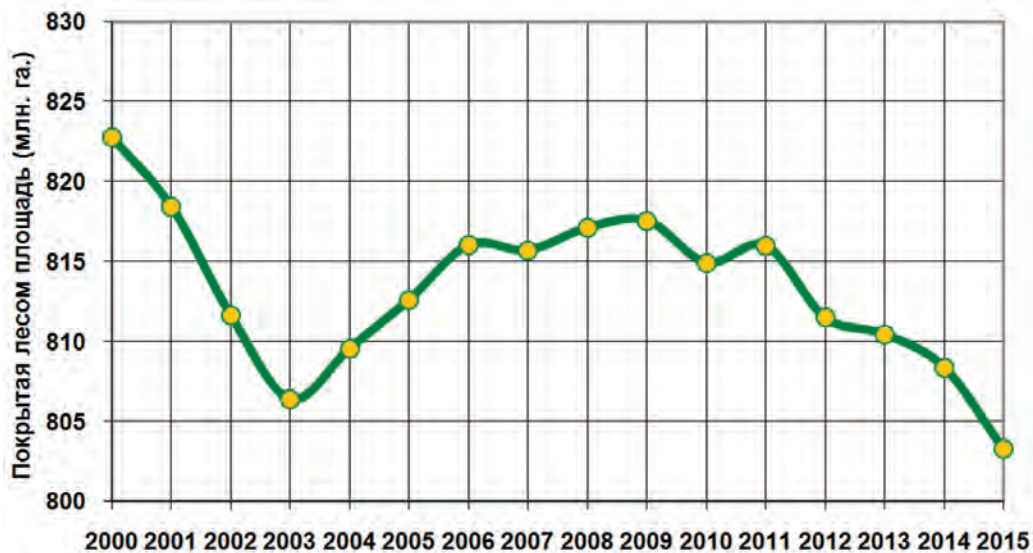


Рис. 4.4. Динамика покрытой лесом площади

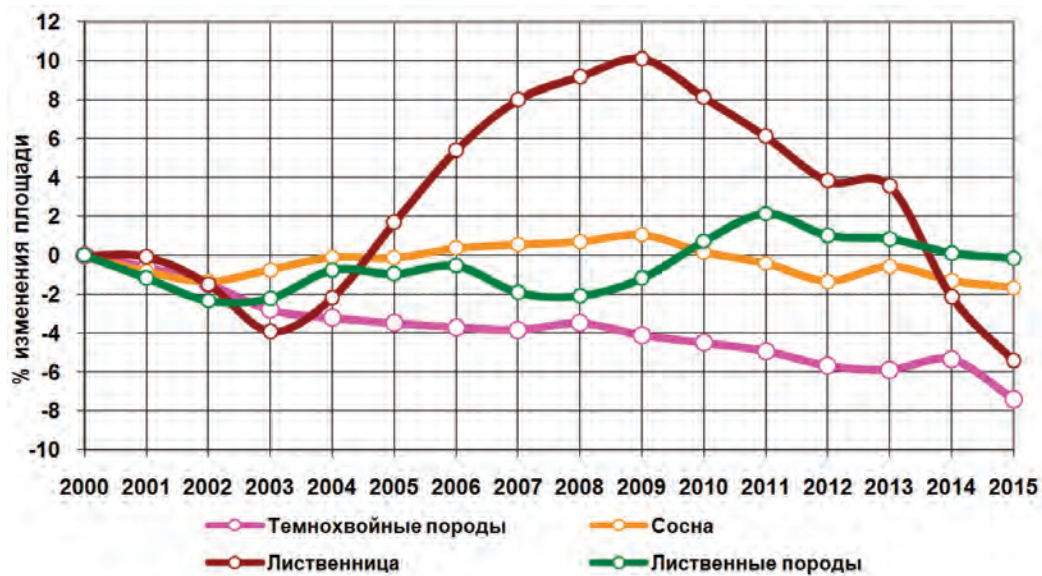


Рис. 4.5. Относительное (%) изменение площади лесов различных пород

4.3. Картографирование породной структуры лесов на основе спутниковых данных

Описанный в предыдущем разделе метод спутникового картографирования растительного покрова России позволяет получать информацию о лесах страны. В то же время метод позволяет выделять лишь ограниченное число классов лесов, различающихся преобладанием групп древесных пород, что не в полной мере удовлетворяет требованиям решения задач управления лесами. Одной из важнейших характеристик лесов является преобладающая древесная порода, знание которой необходимо для решения широкого спектра лесоводственных и лесохозяйственных задач. Известные до настоящего времени методы спутниковой оценки породной структуры лесов (Colgan et al., 2012; Engler et al., 2013; Гаврилюк, Ершов, 2013) имеют, как правило, локальное или региональное применение в силу ограниченного пространственного охвата и временного разрешения используемых данных ДЗЗ. Существующий опыт спутникового картографирования породной структуры лесов на больших территориях (Wilson et al., 2012; Beaudoin et al., 2014; Schepaschenko et al., 2011) основан на привлечении большого объема наземных данных, что ограничивает возможности регулярного применения такого рода подходов.

Разработанный метод использования временных рядов спутниковых данных для картографирования преобладающих древесных пород в лесах России основан на различиях фенологической динамики их спектрально-отражательных характеристик. Известно, что леса разных пород могут демонстрировать различную динамику фенологического развития (Елагин, 1994). Так, появление листьев на деревьях дуба в основном происходит на 2–3 недели позже, чем у деревьев других лиственных пород в сходных климатических условиях. Цветение липы происходит позже других лиственных пород. Для березы характерно ранее появление листьев весной и позднее их опадание осенью. У ели в начале лета заканчивается рост хвои и начинается ее вызревание раньше, чем у пихты и кедра. Таким образом, интервал между наступлением соответствующей фазы для деревьев разных пород, находящихся в одинаковых географических условиях, может составлять от недели и более. Фенологическая динамика лесов различных пород проявляется в различиях эволюции их спектрально-отражательных характеристик в течение вегетационного сезона, что может быть использовано для их разделения по данным ДЗЗ высокого временного разрешения (рис. 4.6).

Метод включает формирование временных рядов еженедельных композитных изображений КСЯ земной поверхности, отражающих характерную динамику спектрально-отражательных характеристик лесного покрова в течение вегетационного сезона. Для этого используются данные ежедневных спутниковых наблюдений прибором MODIS – стандартные продукты MOD09GA и MOD09GQ, представляющие информацию о КСЯ земной поверхности с коррекцией влияния атмосферы. Используемый для предварительной обработки данных ДЗЗ подход (см. раздел 3.1) позволяет формировать временные ряды 7-дневных композитных изображений КСЯ земной поверхности в красном (0,62–0,67 мкм) и ближнем ИК (0,84–0,88 мкм) каналах для всей территории России. Измерения КСЯ в указанных спектральных диапазонах имеют пространственное разрешение 250 м и широко используются для картографирования растительности.

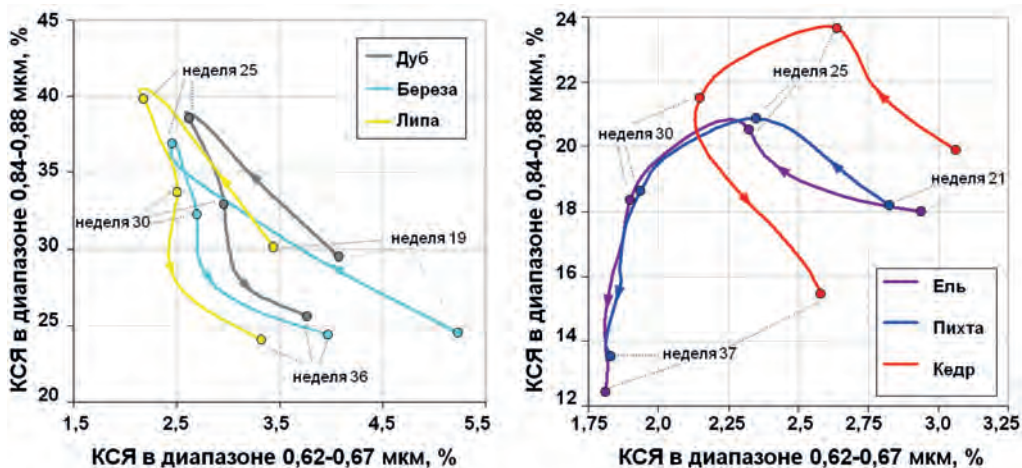


Рис. 4.6. Динамика КСЯ лесов с преобладанием различных пород по данным MODIS

Наличие облачного покрова может для ряда территорий приводить к отсутствию данных наблюдений земной поверхности в течение 7-дневного периода. Кроме того, относительно небольшой период формирования композитного изображения может снижать эффективность статистической фильтрации временных рядов КСЯ в силу недостаточного числа информативных измерений. Указанные факторы приводят к наличию пропусков и шумов в композитных изображениях КСЯ. Для формирования свободных от шумов временных рядов измерений КСЯ лесного покрова в течение вегетационного сезона используются многолетние данные MODIS в предположении относительно медленной межгодовой эволюции спектрально-отражательных характеристик лесов при отсутствии воздействия таких деструктивных факторов, как, например, пожары, вырубki, ветровалы или насекомые-вредители. Исходя из этого предположения, для формирования свободных от шумов временных рядов измерений КСЯ лесного покрова был эмпирически выбран 7-летний период комплексирования многолетних спутниковых данных.

С учетом вышеуказанного предположения характерное значение КСЯ лесов в рассматриваемый 7-дневный период года рассчитывалось как медиана многолетних значений КСЯ композитных изображений, сформированных для данного периода текущего года и шести предыдущих лет. Поскольку динамика КСЯ лесов в целом характеризуется монотонным возрастанием/убыванием с одним экстремумом в течение вегетационного сезона, значения КСЯ для предыдущего и последующего 7-дневных периодов относительно рассматриваемого также включаются в расчет медианы многолетних измерений (рис. 4.7).

Применение описанных выше методов к многолетним (начиная с 2000 г.) данным MODIS позволило сформировать для территории России временные ряды композитных изображений КСЯ земной поверхности в красном (0,62–0,67 мкм) и ближнем ИК (0,84–0,88 мкм) диапазонах, отражающие характерную фенологическую динамику лесов с пространственным разрешением 250 м и недельным временным разрешением.

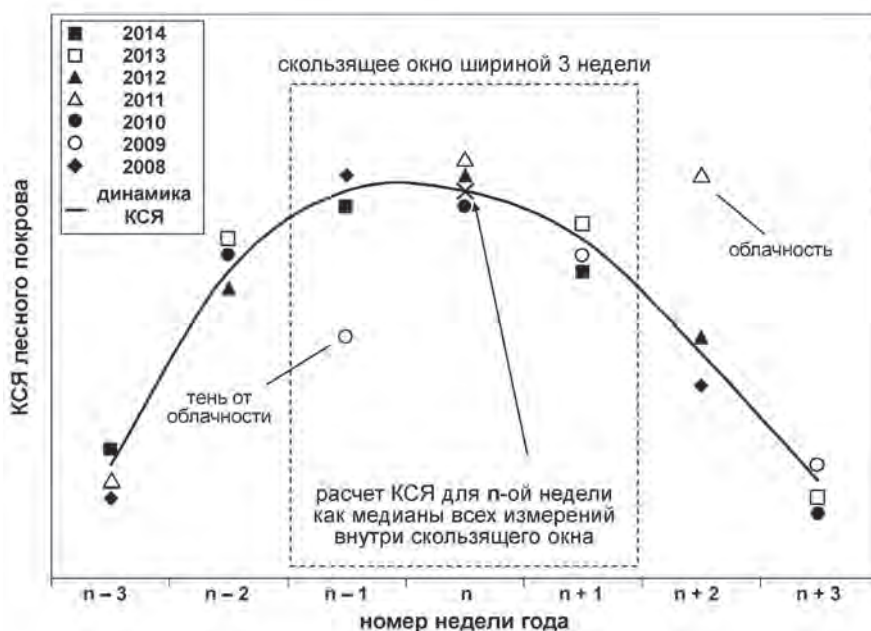


Рис. 4.7. Схематический пример восстановления сезонной динамики КСЯ лесного покрова в ближнем ИК диапазоне на основе 7-дневных композитных изображений по многолетним данным MODIS

Дополнительная обработка временных рядов КСЯ включала в себя их сглаживание и фильтрацию остаточных шумов на основе алгоритма полиномиальной аппроксимации динамическим скользящим окном (Плотников и др., 2014; раздел 3.3). При этом особенности работы алгоритма аппроксимации, а так же различные метеорологические условия приводят к тому, что время появления первых значащих измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности в начале сезона отличается для различных территорий. Для обеспечения одинакового количества измерений в течение вегетационного сезона недостающие значения КСЯ заполнялись данными, соответствующими первому значащему измерению в начале сезона. Аналогичная процедура использовалась в конце вегетационного сезона для обеспечения одинакового числа измерений КСЯ временного ряда. Кроме того, диапазоны значений КСЯ лесов в красном и ближнем ИК каналах в течение вегетационного сезона существенно отличаются, и для обеспечения корректности совместного анализа измерений в различных спектральных диапазонах было выполнено их нормирование приведением к равным значениям среднего и дисперсии.

Кроме того, были сформированы композитные изображения за зимние периоды 2006–2015 годов, характеризующие пространственное распределение КСЯ покрытого снегом земного покрова для территории России с разрешением 250 м (метод построения описан в разделе 4.4). Значения КСЯ такого изображения характеризуют тип и структуру лесного покрова, что делает их информативными при распознавании древесных пород.

Для каждого года в период 2006–2015 гг. было сформировано 46 композитных изображений, характеризующих временную изменчивость отражательной способности лесов в красном (0,62–0,67 мкм) и в ближнем ИК (0,84–0,88 мкм) диапазонах, включая 22 изображения за период 15 мая – 31 сентября и изображение покрытой снегом поверхности.

Проведенные эксперименты (Жарко, Барталев, 2014) показали, что сформированные на основе описанного подхода значения КСЯ являются информативными признаками распознавания древесных пород. Для лесов различных пород на территории двух тестовых участков были рассчитаны значения трансформированной дивергенции, являющейся статистической мерой разделимости классов в пространстве используемых признаков. Указанная величина принимает значения в диапазоне 0–2000 и вычисляется как:

$$D_{ij}^T = 2000(1 - \exp(-D_{ij} / 8)), \quad (4.6a)$$

$$D_{ij} = \text{tr}[(\Sigma_i - \Sigma_j)(\Sigma_j^{-1} - \Sigma_i^{-1})] / 2 + \text{tr}[(\Sigma_i^{-1} + \Sigma_j^{-1})(U_i - U_j)(U_i - U_j)^T] / 2, \quad (4.6b)$$

где D_{ij}^T – преобразованная дивергенция, Σ_i и Σ_i^{-1} – ковариационная матрица i -го класса и обратная ей матрица соответственно, U_i – вектор средних значений признаков i -го класса, $\text{tr}(\dots)$ и $(\dots)^T$ – матричные операции следа (суммы диагональных элементов) и транспонирования матрицы соответственно. Результаты проведенных расчетов свидетельствуют о разделимости классов (*табл. 4.3*).

Таблица 4.3. Трансформированная дивергенция пар тематических классов, соответствующих лесам различных пород (Жарко, Барталев, 2014). Согласно имеющимся критериям (Jensen, 1996), значения > 1700 соответствуют разделимым классам

		1	2	3	4	5	6	7	8
Ель	1								
Пихта	2	1839							
Кедр	3	1944	1970						
Сосна	4	1999	2000	1985					
Дуб	5	2000	-	-	2000				
Береза	6	2000	2000	2000	1996	1889			
Осина	7	2000	2000	2000	2000	1815	1828		
Липа	8	2000	-	-	2000	1918	1998	1716	
Клен	9	2000	-	-	2000	1998	2000	1945	1733

Картографирование породной структуры лесов России выполняется на основе контролируемой классификации совокупности композитных изображений методом LAGMA (раздел 4.1). При этом, поскольку использование многолетних данных

MODIS некорректно для восстановления динамики КСЯ земного покрова с наличием процессов обезлесения или лесовозобновления, определение породной структуры лесов таких участков выполняется на основе отдельного подхода.

Формирование обучающей выборки для классификации композитных изображений выполнялось с использованием карты «Леса СССР» масштаба 1:2,5 млн. (ред. Гарсия, 1990), отражающей пространственное распределение различных преобладающих пород. На основе анализа карты было выбрано 12 классов (*табл. 4.4, столбец 1*), соответствующих лесам основных преобладающих пород, занимающим, согласно официальной статистике, более 98,8% площади лесов РФ. Для подготовки обучающей выборки использовалась временная серия ежегодных карт растительного покрова России (раздел 4.2).

Таблица 4.4. Преобладающие древесные породы лесов и соответствующие им классы карты растительного покрова России

Преобладающая порода		Класс по карте типов растительности
1	Ель	Темнохвойный лес
2	Пихта	
3	Кедр	
4	Сосна	Светлохвойный лес
5	Лиственница	Лиственничный лес
6	Дуб	Лиственный лес
7	Бук	
8	Каменная береза	
9	Береза	
10	Осина	
11	Липа	
12	Клен	

На основе анализа временной серии карт растительного покрова были выбраны пиксели, устойчиво относящиеся в период 2000–2015 гг. только к одному из четырех классов «чистых» (не смешанных) лесов (*табл. 4.4, столбец 2*). Отобранные таким образом стабильные пиксели сформировали опорную выборку с отнесением их к тематическому классу на основе карты «Леса СССР» и *табл. 4.4*.

Для исключения ошибочных пикселей выполнена статистическая фильтрация обучающей выборки на основе итеративной процедуры ее сравнения с результатами классификации. Каждая итерация процедуры коррекции включала в себя использование текущей версии обучающей выборки для классификации композитных изображений КСЯ и исключение из выборки пикселей, тематический класс которых не совпадает с результатом классификации. Изменение размера выборки с увеличением числа итераций приведено в *табл. 4.5*.

Метод локально-адаптивной классификации земного покрова LAGMA (раздел 4.1) предусматривает использование пространственно-распределенной инфор-

мации о величинах априорной вероятности классов. Эти данные могут рассматриваться в качестве индикатора возможности присутствия класса на территории, что позволяет повысить точность классификации и снизить вычислительную нагрузку. Пространственное распределение тематических классов оценивалось на основе карты «Леса СССР» (ред. Гарсия, 1990) путем поиска границ ареалов распространения древесных пород и присвоения соответствующим классам максимальной априорной вероятности. Дополнительная обработка фильтром пространственного сглаживания обеспечила плавное изменение значений априорной вероятности в интервале от 0 до 1 в граничной полосе (шириной 100 км) каждого из ареалов распространения пород.

Таблица 4.5. Результаты итеративной статистической фильтрации обучающей выборки

Номер итерации	0	1	2	3	4	5
Размер выборки	100,0%	91,4%	90,2%	89,8%	89,6%	89,5%

Сформированные таким образом данные обучающей выборки и априорных вероятностей классов используются для контролируемой классификации разновременных композитных изображений КСЯ, отражающих изменчивость спектрально-отражательных характеристик лесов. Для классификации используется также маска лесов, сформированная на основе карты растительного покрова России (см. раздел 4.2) за соответствующий год. Анализ временного ряда ежегодных карт лежит в основе выявления участков земного покрова, подверженных влиянию процессов обезлесения или лесовосстановления в течение периода, использовавшегося для оценки динамики КСЯ. Для не удовлетворяющих условиям стабильности участков (около 5% покрытой лесом площади РФ) использование многолетних данных MODIS для восстановления динамики КСЯ считается некорректным. Тематические классы, к которым могут принадлежать такие пиксели, определяются на основе информации о лесах по данным карты растительного покрова России. В случае принадлежности пикселей к «чистым» (не смешанным) лесам по карте растительного покрова, соответствующие преобладающим породам классы задаются в соответствии с *табл. 4.4*. Для пикселей смешанных лесов возможными считаются все соответствующие классу хвойные и лиственные породы (*табл. 4.4, столбец П*). Для каждого такого пикселя выполняется статистический анализ результатов классификации участков стабильного лесного покрова внутри окна заданного размера с центром на рассматриваемом пикселе. Пикселю приписывается наиболее часто встречаемая по результатам классификации возможная преобладающая порода внутри указанного окна. Начальный размер окна, составляющий 3×3 пикселя, постепенно увеличивается до тех пор, пока внутри него не появляется хотя бы один пиксель, принадлежащий к одному из возможных тематических классов.

На заключительном этапе выполняется пространственная и временная фильтрация результатов классификации. Пространственная фильтрация направлена на исключение небольших по размерам, т.е. не превышающих трех пикселей, групп связанных пикселей одного класса. При этом два соседних пикселя одного класса считаются связанными при наличии общей стороны. Новый класс для исключенных

пикселей определяется на основе анализа результатов классификации окружающих его пикселей. Для каждого пикселя также анализируется временное распределение результатов классификации, и определяется доминирующий класс за период 2006–2015 годов. В случае если в рассматриваемом году пиксель не относится к доминирующему классу, а в предыдущем и последующем годах он классифицировался как доминирующий класс, то результат корректируется.

Применение совокупности вышеописанных методов позволило построить временной ряд карт преобладающих древесных пород в лесах России за период 2006–2015 годов с пространственным разрешением 250 м. Легенда карт содержит 12 классов, соответствующих лесам с преобладанием (по доле площади кроны в их проекции на земную поверхность) древесных пород, включая Ель (*Picea*), Пихту (*Abies*), Сосну кедровую (*Pinus sibirica/Pinus koraiensis*), Сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris*), Лиственницу (*Larix*), Дуб (*Quercus*), Бук (*Fagus*), Березу Каменную (*Betula ermanii*), Березу (*Betula*), Осину (*Populus tremula*), Липу (*Tilia*), Клен (*Acer*) и не покрытые лесом территории (сомкнутость полога < 20%). Пример сформированной карты приведен на *рис. 4.8*.

Для анализа достоверности полученных результатов было выполнено сравнение рассчитанных на их основе оценок доли площади лесов России с преобладанием различных пород и данных официальной статистики (*рис. 4.9*). Результаты сравнения характеризуются значением $R^2 = 0,99$, что говорит о высокой степени согласованности данных при их пространственной агрегации на уровне страны.

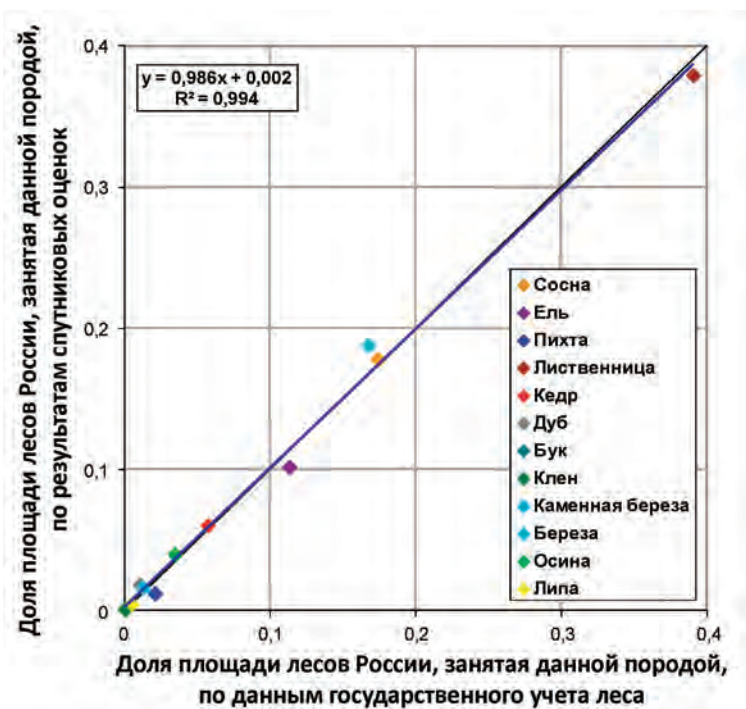


Рис. 4.9. Сравнение оценок доли площади лесов РФ с преобладанием различных пород по данным спутникового картографирования и государственного учета лесов

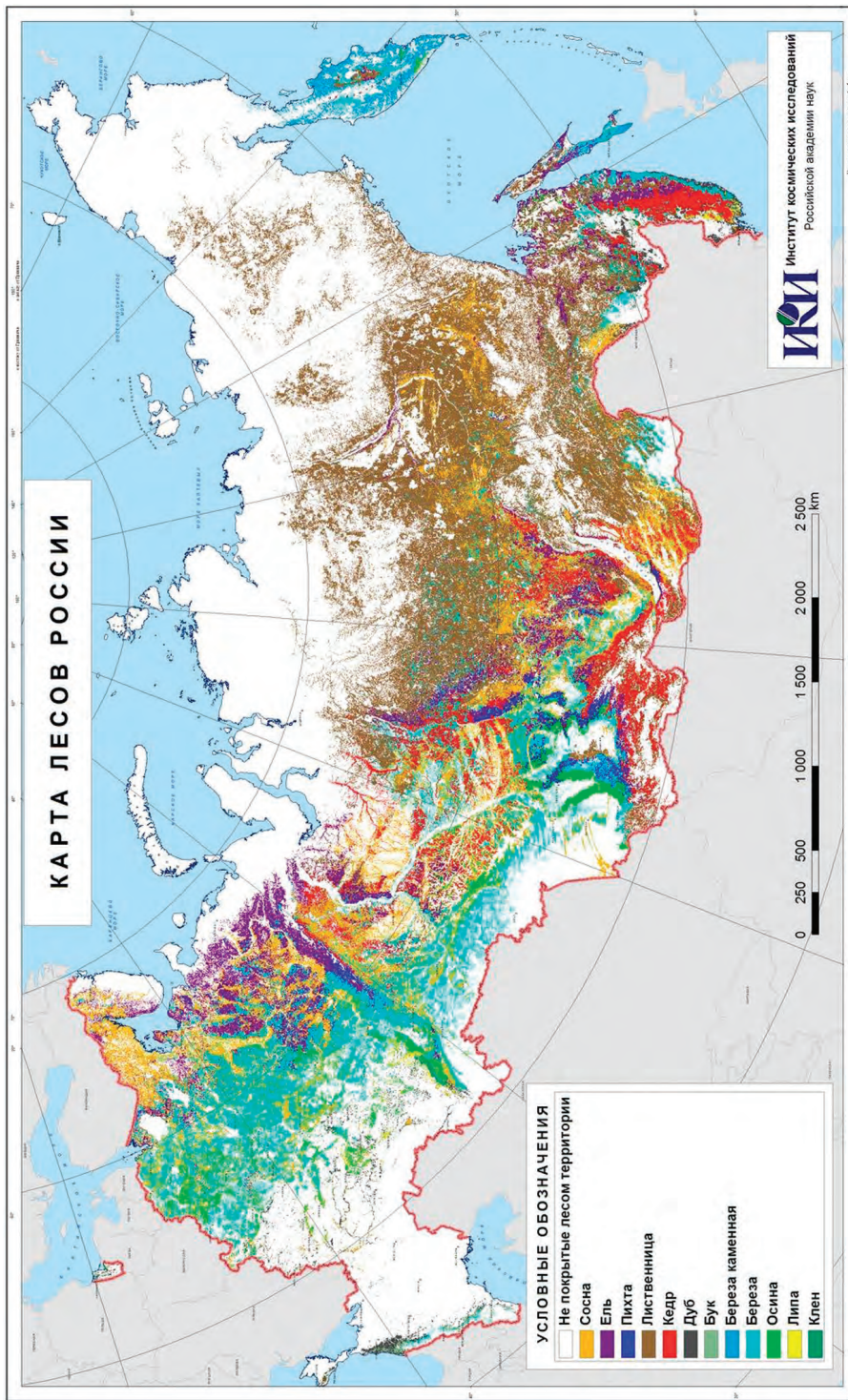


Рис. 4.8. Карта преобладающих древесных пород в лесах России на основе данных MODIS

Кроме того, полученные результаты были использованы для оценки площадей, занятых лесами с преобладанием каждой из рассматриваемых пород в разных субъектах РФ, которые также сравнивались с показателями официальной статистики. Рассчитанный при этом коэффициент R^2 принимал значения в диапазоне от 0,81 для лесов с преобладанием осины до 0,98 для лесов с преобладанием лиственницы, что говорит о согласованности полученных данных с показателями статистики и на региональном уровне. В то же время актуальной является задача валидации полученных результатов на основе данных наземных наблюдений и/или данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения.

4.4. Оценка запасов стволовой древесины в лесах на основе спутниковых данных

Результаты проведенных к настоящему времени исследований свидетельствуют, что данные ДЗЗ могут использоваться для глобальной оценки биофизических параметров лесов таких, как, например, сомкнутость (Hansen et al., 2013), высота (Simard et al., 2011) и биомасса/запас древесины (Houghton et al., 2007; Santoro et al., 2015; Hu et al., 2016).

Надземная биомасса и связанная с ней величина запаса стволовой древесины являются важнейшими показателями продуктивности, структуры и состояния лесного покрова. Данные о пространственном распределении и динамике запаса древесины в лесах широко востребованы для управления лесным хозяйством и лесопользованием, для мониторинга и оценки последствий лесных пожаров, решения ряда других прикладных и научных задач. Информация такого рода имеет ключевое значение при проведении биосферных исследований, моделировании углеродного цикла, в том числе при оценке антропогенных эмиссий углерода в атмосферу. При этом, несмотря на наличие методов спутниковой оценки надземной биомассы, и в частности запаса стволовой древесины (Lu, 2006), данные о пространственном распределении биомассы/запаса в лесах на территории России по результатам обработки данных ДЗЗ весьма ограничены.

Использование данных MODIS (500 м), полученных в летний период 2000 года, в сочетании с наземными данными позволило провести картографирование биомассы в лесах России (Houghton et al., 2007). Применение алгоритма BIOMASAR к разновременным данным радиолокационного прибора ASAR на спутнике Envisat дало возможность сформировать карту запасов стволовой древесины в лесах северного полушария по состоянию на 2010 год с пространственным разрешением 1 км (Santoro et al., 2015). Глобальное картографирование надземной лесной биомассы было выполнено и на основе оптических и лидарных (прибор GLAS со спутника ICESat) спутниковых данных 2004 года с пространственным разрешением 1 км (Hu et al., 2016). Предложенный метод также требует наличия наземных данных.

Таким образом, наиболее актуальным набором данных о пространственном распределении запаса стволовой древесины в лесах России, полученным на основе результатов спутниковых измерений, является карта BIOMASAR. При этом картографирование запаса с помощью указанного метода сопряжено с рядом ограни-

чений, накладываемых использованием радарных данных. Так, анализ интенсивности обратного рассеяния микроволнового импульса растительным покровом для оценки величины запаса древесины осложняется насыщением сигнала при больших значениях запаса. Кроме того, данная карта доступна только на 2010 год, а радарные системы пока еще не обеспечивают достаточно однородного и непрерывного покрытия территории России, что снижает возможности формирования однородных рядов данных для анализа динамики запаса стволовой древесины в лесах. Ограничивающим фактором является и достаточно низкое пространственное разрешение имеющихся данных. Одной из целей выполняемого в настоящее время проекта Европейского космического агентства GlobBiomass (<http://globbiomass.org/>) является глобальное картографирование наземной биомассы с пространственным разрешением 150–500 м.

Разработанный метод спутниковой оценки запаса стволовой древесины в лесах России основан на использовании оптических данных ДЗЗ, полученных в зимний период. Наличие снежного покрова приводит к маскированию на спутниковых изображениях различных типов земного покрова за исключением древесной растительности. Снег имеет высокую отражательную способность в видимой части спектра, а вариации КСЯ лесов по спутниковым данным зимнего периода определяются главным образом долей проективного покрытия земной поверхности кронами деревьев и их тенями (рис. 4.10). Это, в свою очередь, обуславливает тесную взаимосвязь КСЯ покрытого снегом земного покрова и удельного запаса стволовой древесины [м³/га]. В основе разработанного метода оценки запаса лежит моделирование и оценка параметров этой взаимосвязи. При этом параметризация модели выполняется на основе карты BIOMASAR, как наиболее актуальных данных о пространственном распределении запаса в лесах России в условиях отсутствия для всей территории страны пространственно-распределенных репрезентативных наземных данных.

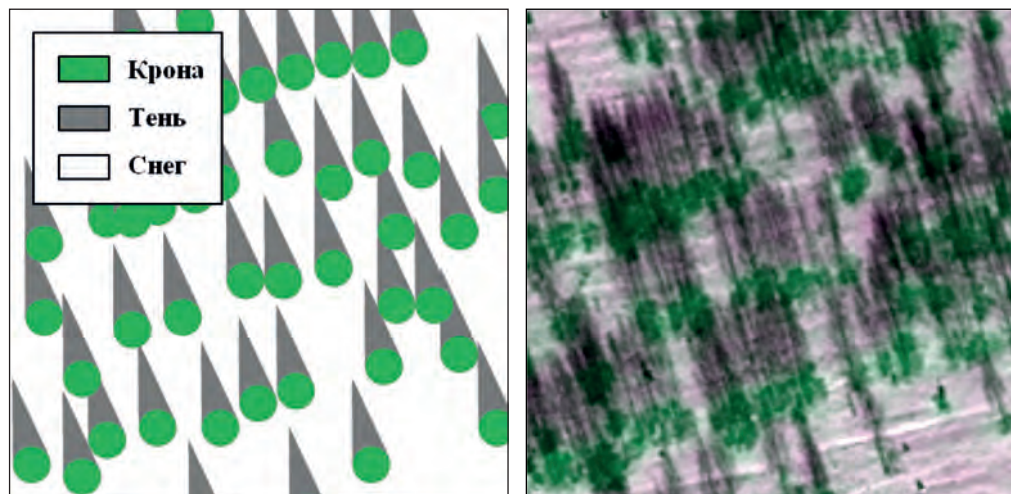


Рис. 4.10. Схематическое изображение деревьев в пикселе данных ДЗЗ низкого пространственного разрешения (слева) и фрагмент спутникового изображения GeoEye (справа, © DigitalGlobe)

Использование летних спутниковых данных оптического диапазона для оценки запаса древесины осложняется эффектом насыщения зависимости значений КСЯ от величины запаса после достижения максимальной сомкнутости крон. Разработанный метод менее подвержен указанному ограничению (в особенности при оценке запаса в листопадных лесах) благодаря маскирующему и контрастирующему эффектам, вызванным наличием снежного покрова под пологом леса. Информативность данных ДЗЗ зимнего периода для оценки биомассы/запаса отмечалась также рядом других исследователей (Сочилова, Ершов, 2012; Beaudoin et al., 2014).

Для формирования композитных изображений, отражающих пространственное распределение значений КСЯ покрытого снегом земного покрова в красном и ближнем ИК спектральных каналах, были использованы данные ежедневных измерений прибором MODIS – стандартные продукты MOD09GA и MOD09GQ за период с 1 ноября по 31 марта фиксированного года. Снег имеет высокие значения КСЯ в видимой области спектра и низкие его значения в среднем ИК диапазоне (рис. 4.11). При этом характерный для снега вид кривой отражательной способности не встречается у других типов земного покрова.

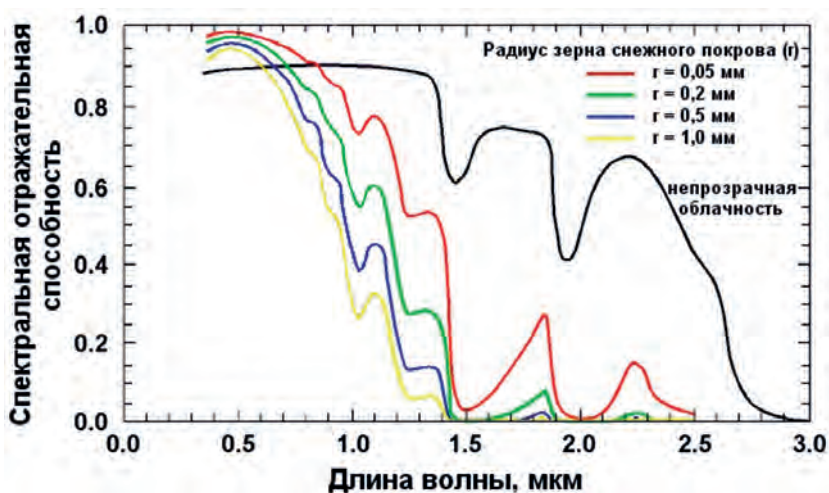


Рис. 4.11. Спектральная отражательная способность облачности и снежного покрова различной структуры (<http://www.noahrs.noaa.gov/technology/avhrr3a/avhrr3a.html>)

Это позволяет рассчитать нормализованный разностный индекс снега *NDSI*, значения которого отражают количественные и качественные характеристики снежного покрова. В частности, показано, что пиксели спутниковых изображений, доля покрытой снегом площади которых составляет более 50%, демонстрируют значения $NDSI \geq 0,4$ (Hall et al., 2001). При этом снежному покрову в лесу соответствуют более низкие значения индекса, вплоть до $NDSI = 0,15$ (Klein et al., 1998). Кроме того, в среднем ИК диапазоне снег имеет заметно более низкие значения отражательной способности, чем облачность (рис. 4.11), что может быть использовано для их взаимного разделения по данным ДЗЗ.

С учетом вышеуказанных положений разработан набор эмпирических критериев для отбора безоблачных спутниковых измерений КСЯ земной поверхности с наличием снежного покрова:

$$NDSI = \frac{R^{0,47} - R^{1,64}}{R^{0,47} + R^{1,64}} \geq 0,2; \quad R^{2,13} \leq 0,09, \quad (4.7)$$

где $R^{0,47}$, $R^{1,64}$ и $R^{2,13}$ – результаты измерений КСЯ земного покрова соответственно в каналах MODIS 0,46–0,48 мкм, 1,63–1,65 мкм и 2,11–2,16 мкм. Для исключения измерений, подверженных влиянию теней от облаков и других мешающих факторов, выполняется статистическая фильтрация. При этом отобранные на предыдущем этапе результаты ежедневных измерений КСЯ земной поверхности за зимний период R_i используются для оценки средних (M) и стандартных отклонений (σ) значений КСЯ для каждого пикселя. В случае если результаты ежедневных измерений КСЯ поверхности отличались от среднего значения более чем на 2σ , то есть выполнялось условие:

$$|M - R_i| > 2\sigma, \quad (4.8)$$

данные измерений КСЯ отфильтровывались. Оставшиеся измерения усреднялись для получения скорректированных оценок средних КСЯ за рассматриваемый период, используемых для формирования композитного изображения земной поверхности с наличием снежного покрова. Применение этого подхода позволило сформировать однородный временной ряд ежегодных композитных изображений территории России с разрешением 250 м за период с начала 2000 года (пример на рис. 4.12), характеризующих пространственное распределение значений КСЯ покрытого снегом земного покрова в красном и ближнем ИК каналах MODIS.

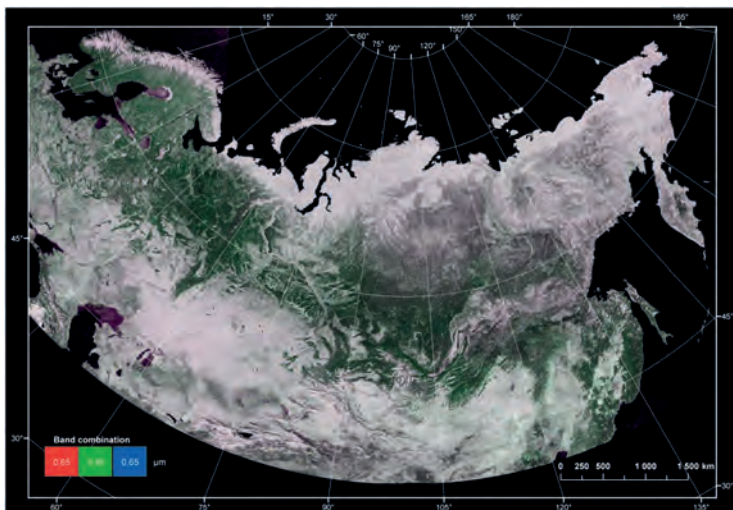


Рис. 4.12. Пример зимнего композитного изображения КСЯ покрытой снегом земной поверхности по данным MODIS (псевдоцвета R: 0,65 мкм; G: 0,86 мкм; B: 0,65 мкм)

С вводом в эксплуатацию новых систем ДЗЗ обеспечивается возможность оценки запаса стволовой древесины на основе разработанного метода с более высоким пространственным разрешением (рис. 4.13). Запущенный в 2013 году спутник Proba-V измеряет КСЯ земной поверхности для территории России каждые три дня с пространственным разрешением 115 м. С запуском спутников Landsat-8 (2013 г.) и Sentinel-2A (2015 г.) появилась возможность регулярного получения данных с пространственным разрешением 10–30 м, которые также могут использоваться для оценки запасов древесины в лесах.

В то же время с повышением пространственного разрешения растёт и искажающее влияние рельефа местности на данные оптических спутниковых измерений, что, в связи с относительно низкой высотой Солнца, особенно сильно проявляется в зимний период.

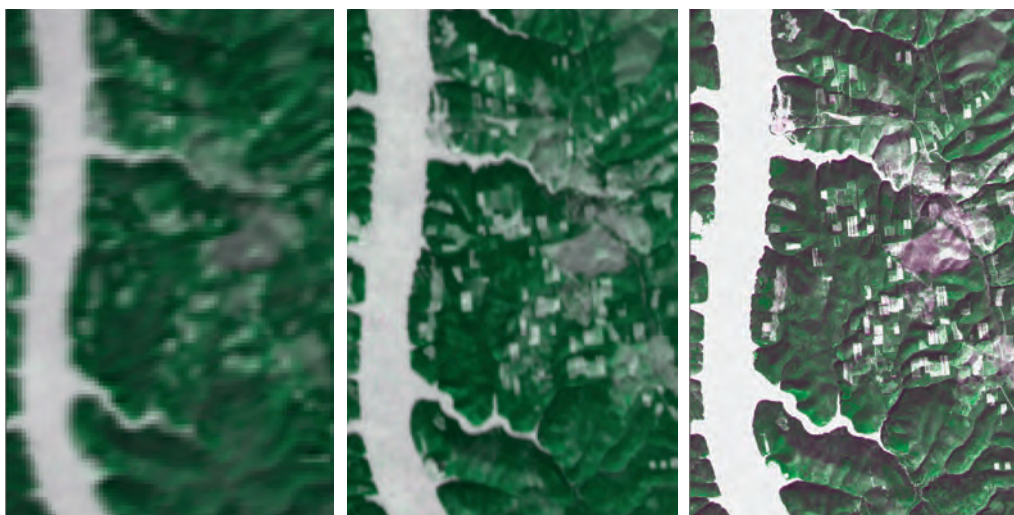


Рис. 4.13. Лес на побережье Ангары; видны вырубki и следы пожаров. Зимние изображения по данным MODIS (слева, разрешение 250 м), Proba-V (в центре, 115 м) и Landsat 8 (справа, 30 м) (псевдоцвета R: КСЯ в красном канале; G: КСЯ в ближнем ИК канале; B: КСЯ в красном канале)

При оценке запаса лесов по данным ДЗЗ указанное ограничение может быть учтено методами топографической нормализации данных (раздел 3.2) или стратификацией территории с выделением различных по степени затененности (освещенности) участков с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР).

Для исследования взаимосвязи значений КСЯ и запаса стволовой древесины использовалась карта BIOMASAR (<http://biomasar.org/>), сопровождаемая информацией о количестве спутниковых наблюдений и погрешностях оценки. Согласно описанию BIOMASAR, высокая достоверность оценок величины запаса обеспечивается при использовании данных более 20 разновременных наблюдений прибором ASAR. На основе этого критерия для дальнейшего анализа были выбраны пиксели карты, имеющие высокую достоверность оценки запаса. Кроме того, из ана-

лиза были исключены оценки запаса лесов, полученные на основе интерполяции значений соседних пикселей. Отфильтрованная таким образом карта BIOMASAR использовалась совместно с деградированным до пространственного разрешения 1 км композитным изображением MODIS, полученным по данным съемки зимой 2009–2010 годов, для параметризации модели зависимости КСЯ покрытого снегом земного покрова от запаса стволовой древесины в лесах.

Кроме того, для анализа взаимосвязи значений КСЯ покрытой снегом поверхности и запаса древесины в различных типах лесов были подготовлены опорные данные о пространственном распределении типов растительного покрова на территории России с разрешением 1 км. Для этого на основе анализа временной серии карт растительного покрова России за период с 2000 по 2014 год (раздел 4.2), были выявлены участки, устойчиво относящиеся к одному классу растительного покрова. Таким образом, было сформировано деградированное до уровня пространственного разрешения 1 км цифровое изображение с известной принадлежностью каждого пикселя к различным типам растительного покрова. Сформированный набор опорных данных о пространственном распределении типов растительного покрова использовался для моделирования зависимости КСЯ земной поверхности с наличием снежного покрова от запаса стволовой древесины лесов.

Моделирование указанного соотношения выполнялось в предположении обратной пропорциональности запаса лесов и значений КСЯ в диапазоне 0,62–0,67 мкм (рис. 4.14) на основе следующей зависимости:

$$GSV = A_i(p, q) * inv_RED + B_i(p, q), \quad (4.9)$$

где GSV – запас древесины, inv_RED – величина, обратная КСЯ покрытого снегом земного покрова в красном канале MODIS, $A_i(p, q)$ и $B_i(p, q)$ – локализованные коэффициенты, зависящие от типа лесного покрова. Параметризация указанной модели выполнялась на основе наборов данных о пространственном распределении значений КСЯ, запаса древесины и различных типов растительного покрова с использованием локально-адаптивного подхода LAGMA (раздел 4.1), с последующим восстановлением оценок запаса в пикселях пространственного разрешения 250 м.

В рамках локально-адаптивного подхода территория России покрыта с шагом 20 км регулярной прямоугольной сеткой $G(p, q)$ (p и q – порядковые номера ячейки по осям координат), для каждого узла которой выполнялась оценка средних значений и ковариационных матриц величин inv_RED (по данным композитных изображений) и GSV (по данным BIOMASAR). В каждом узле сетки расчет необходимых статистических параметров выполнялся отдельно для каждого типа i лесов рассматриваемой территории на основе данных о пространственном распределении растительного покрова. Для каждого класса растительного покрова и узла сетки выполнялся анализ не менее 500 пикселей, лежащих в его окрестности. При этом, для обеспечения достаточного количества измерений в области как больших, так и малых значений запаса, при оценке параметров модели в анализ искусственно включались измерения, соответствующие нелесной территории. В свою очередь оценка параметров модели для нелесных типов растительности также включала в себя анализ измерений, соответствующих лесам.

Для каждого узла сетки $G(p, q)$ и i -го класса растительного покрова оценки статистических характеристик использовались для вычисления коэффициентов $A_i(p, q)$ и $B_i(p, q)$ методом наименьших квадратов:

$$A_i(p, q) = \text{cov}_i^{p,q}[\text{inv_RED}, \text{GSV}] / \text{var}_i^{p,q}[\text{inv_RED}], \quad (4.10a)$$

$$B_i(p, q) = \text{mean}_i^{p,q}[\text{GSV}] - A_i(p, q) * \text{mean}_i^{p,q}[\text{inv_RED}]. \quad (4.10б)$$

где $\text{cov}_i^{p,q}[\dots]$, $\text{var}_i^{p,q}[\dots]$ и $\text{mean}_i^{p,q}[\dots]$ обозначают ковариацию, дисперсию и среднее значение указанных в скобках величин. Таким образом, в каждом узле регулярной сетки для различных типов растительного покрова были получены оценки параметров модели соотношения запаса стволовой древесины и КСЯ покрытого снегом земного покрова.

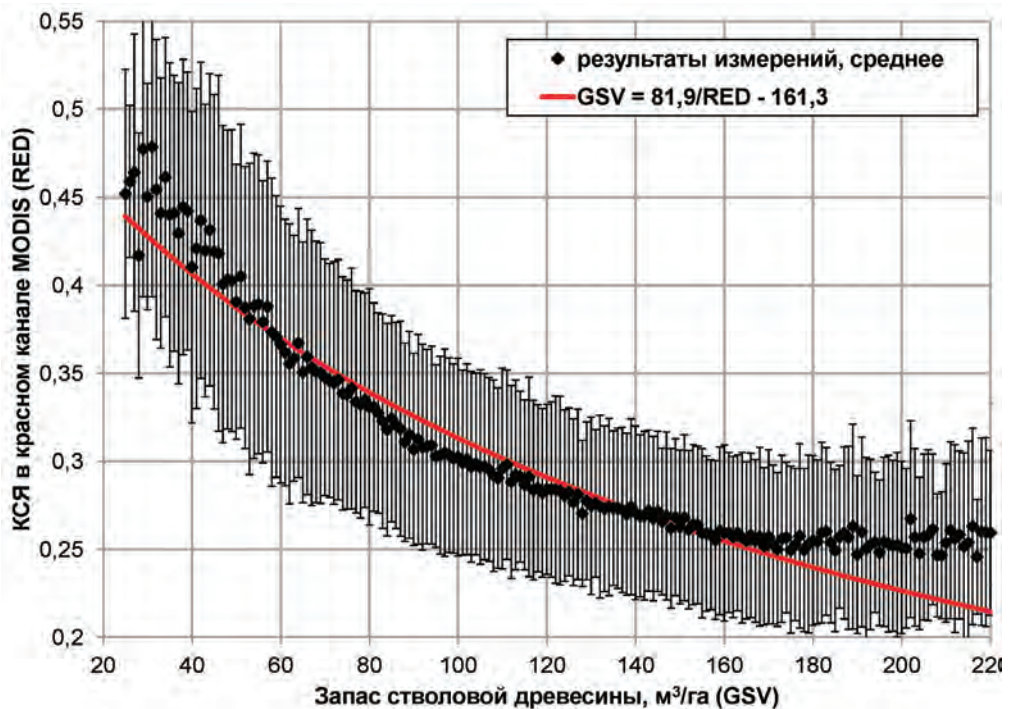


Рис. 4.14. Пример зависимости КСЯ покрытого снегом земного покрова в диапазоне 0,62–0,67 мкм по данным MODIS от запаса стволовой древесины соснового леса на территории России по данным BIOMASAR

Блок-схема метода восстановления уточненных оценок запаса стволовой древесины приведена на рис. 4.15. Для исключения грубых ошибок получаемые оценки запаса древесины дополнительно проверялись на их попадание в интервал значений от 0 до 650 м³/га. При выходе оценок за границы этого интервала соответствующим пикселям присваивались ближайшие граничные значения.

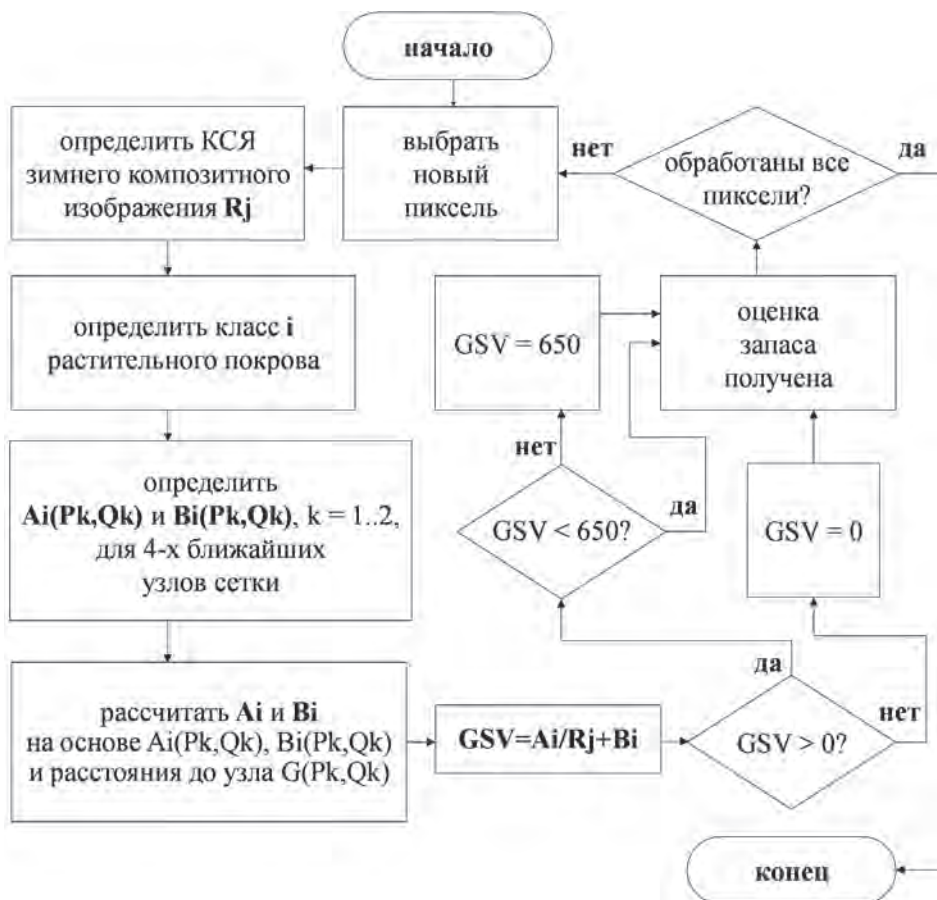


Рис. 4.15. Блок-схема оценки запаса стволовой древесины в лесах по данным спутниковых измерений КСЯ покрытой снегом земной поверхности с разрешением 250 м

Разработанный метод может использоваться для ежегодного картографирования запаса стволовой древесины и оценки его динамики при условии радиометрической однородности многолетних рядов значений КСЯ. Однако анализ временной изменчивости отражательных характеристик покрытой снегом земной поверхности по данным MODIS выявил устойчивое снижение значений КСЯ таких типов земного покрова, как, например, вечные снега и льды, открытая почва и выходы горных пород, травянистая тундра. Уменьшение значений КСЯ покрытой снегом поверхности в красном канале MODIS для этих типов земного покрова за период 2000–2013 годов составило около 2%. Подобная отрицательная динамика измеренных значений КСЯ предположительно связана с деградацией сенсора MODIS, также отмеченной и другими исследователями (Lyapustin et al., 2014; Wang et al., 2012). В этой связи значения КСЯ по данным наблюдений разных лет были скорректированы для приведения их к уровню зимы 2009–2010 годов, что обеспечило возможность получения согласованных оценок запаса стволовой древесины.

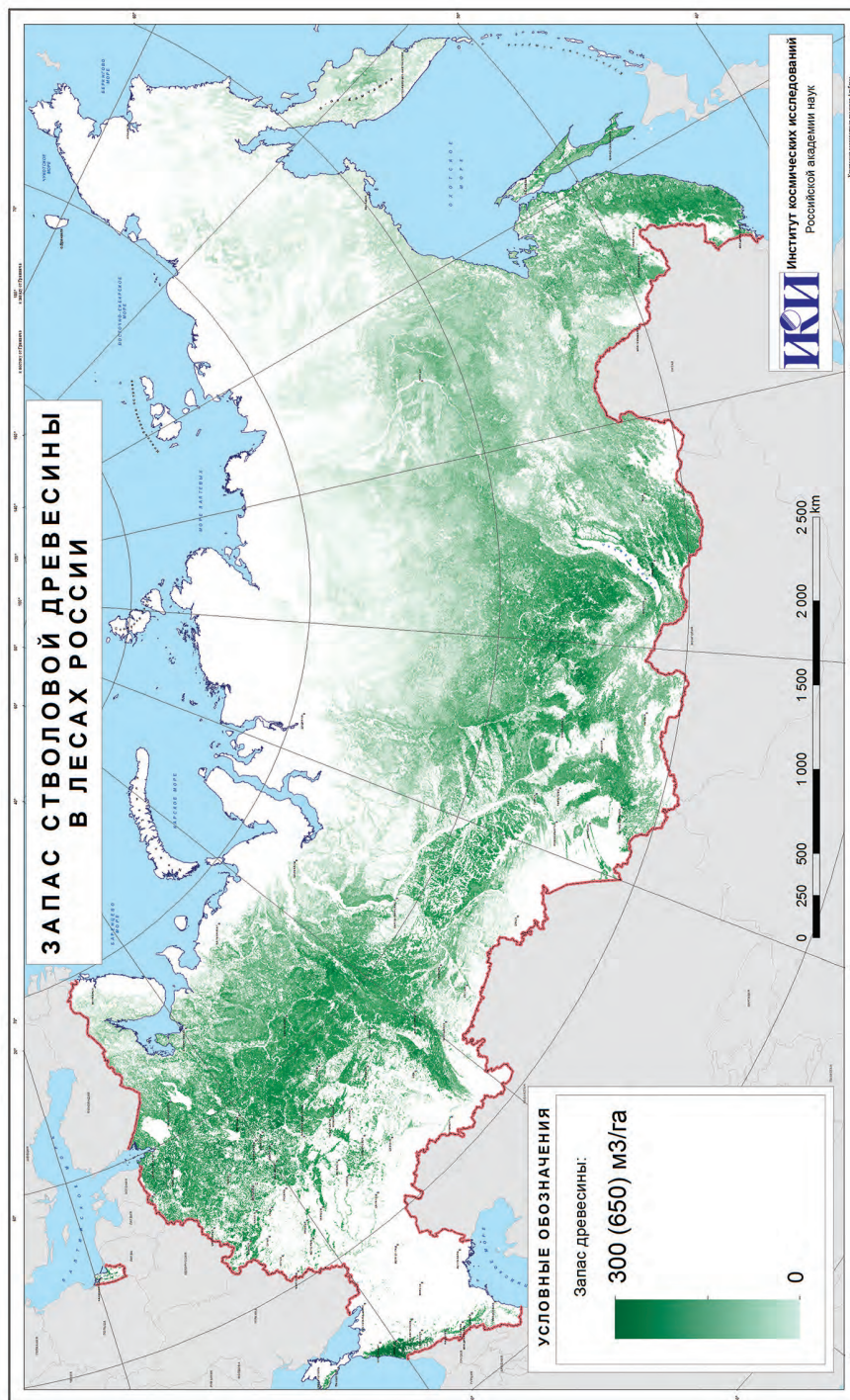


Рис. 4.16. Пример карты запаса стволовой древесины в лесах России по данным MODIS

Разработанный метод был использован для формирования временной серии карт запаса стволовой древесины [$\text{м}^3/\text{га}$] за период с 2001 по 2014 год для территории России с пространственным разрешением 250 м. Пример полученной карты приведен на *рис. 4.16*.

Для анализа достоверности полученных результатов проведено сравнение спутниковых оценок запаса древесины с данными официальной статистики по субъектам РФ (<http://www.fedstat.ru/indicator/data.do?id=38195>). Для обеспечения сопоставимости данных из различных источников спутниковые оценки запаса рассчитывались только для пикселей, соответствующих, согласно карте растительного покрова России (раздел 4.2), лесам. Результаты выполненного сравнения приведены на *рис. 4.17*.

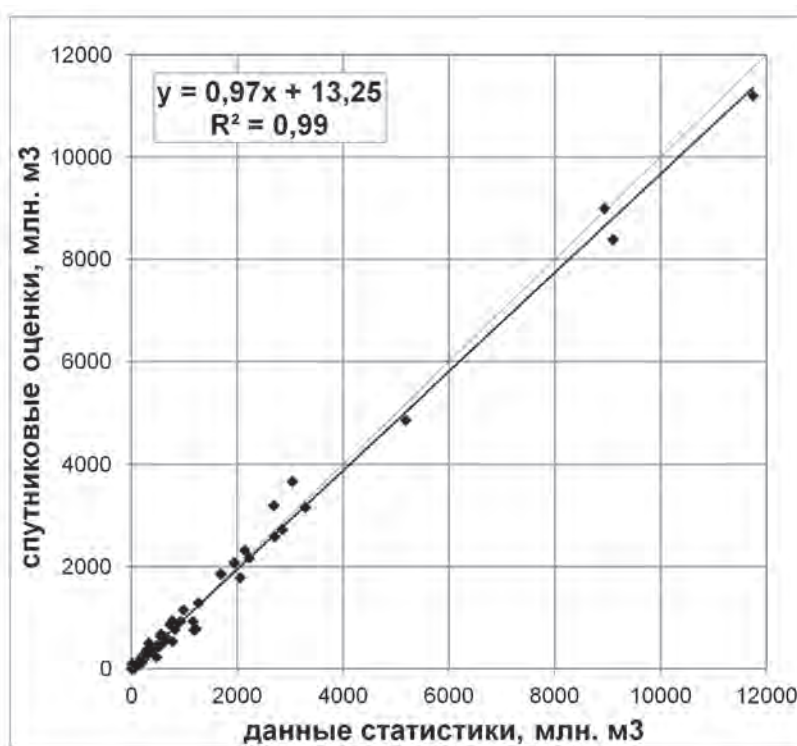


Рис. 4.17. Сравнение интегральных оценок запаса стволовой древесины в лесах субъектов РФ по данным MODIS и официальной статистики

Полученная диаграмма демонстрирует некоторую недооценку величины запаса по спутниковым данным относительно показателей официальной статистики. В то же время значение $R^2 = 0,99$ свидетельствует о высоком уровне согласованности оценок. Для учета различий лесистости различных субъектов РФ было также проведено сравнение оценок удельного запаса стволовой древесины. Для этого полученные оценки величины запаса для каждого субъекта РФ были нормированы на

площадь лесов. Субъекты РФ, для которых площадь лесов по карте растительного покрова и данным официальной статистики отличалась более чем на 20%, были исключены из анализа. Результаты сравнения приведены на *рис. 4.18*.

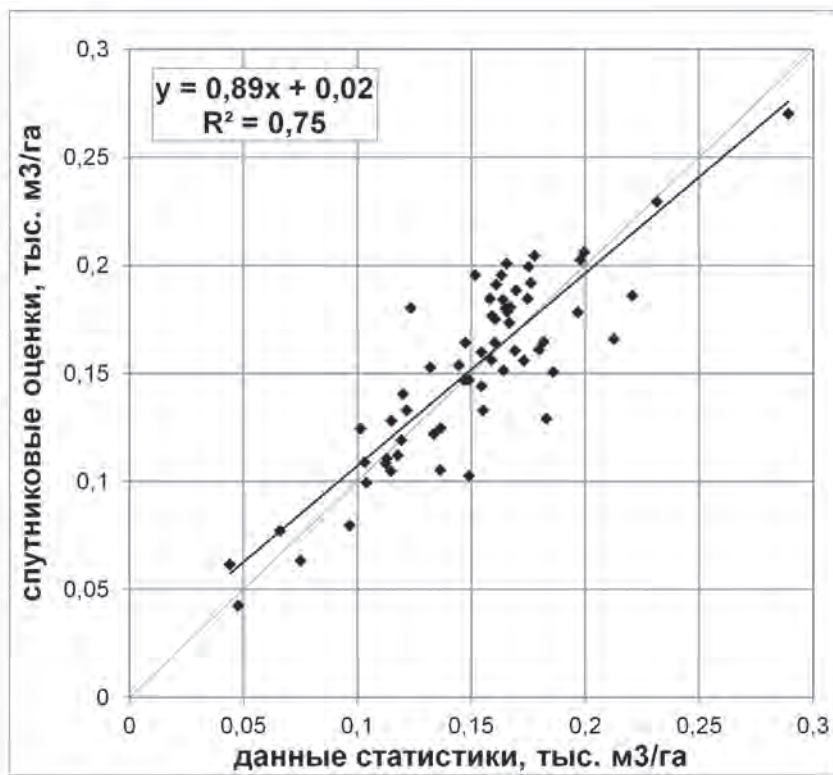


Рис. 4.18. Сравнение интегральных оценок удельного запаса стволовой древесины в лесах субъектов РФ по данным MODIS и официальной статистики

Приведенная диаграмма демонстрирует занижение спутниковых оценок относительно официальной статистики при относительно высоком значении R^2 . При этом актуальной остается задача детальной валидации полученных результатов, сопряженная с необходимостью проведения широкомасштабных наземных обследований.

Разработанный метод был также успешно использован для картографирования запаса стволовой древесины в лесах по данным спутниковой системы Proba-V пространственного разрешения 115 м.

Сравнение полученных результатов (*рис. 4.19*) наглядно показывает целесообразность использования указанных данных для оценки запаса лесов России. Вместе с тем возможность использования данных Proba-V для оценки динамики запаса древесины в настоящее время ограничена недостаточной длительностью накопленных многолетних рядов наблюдений.

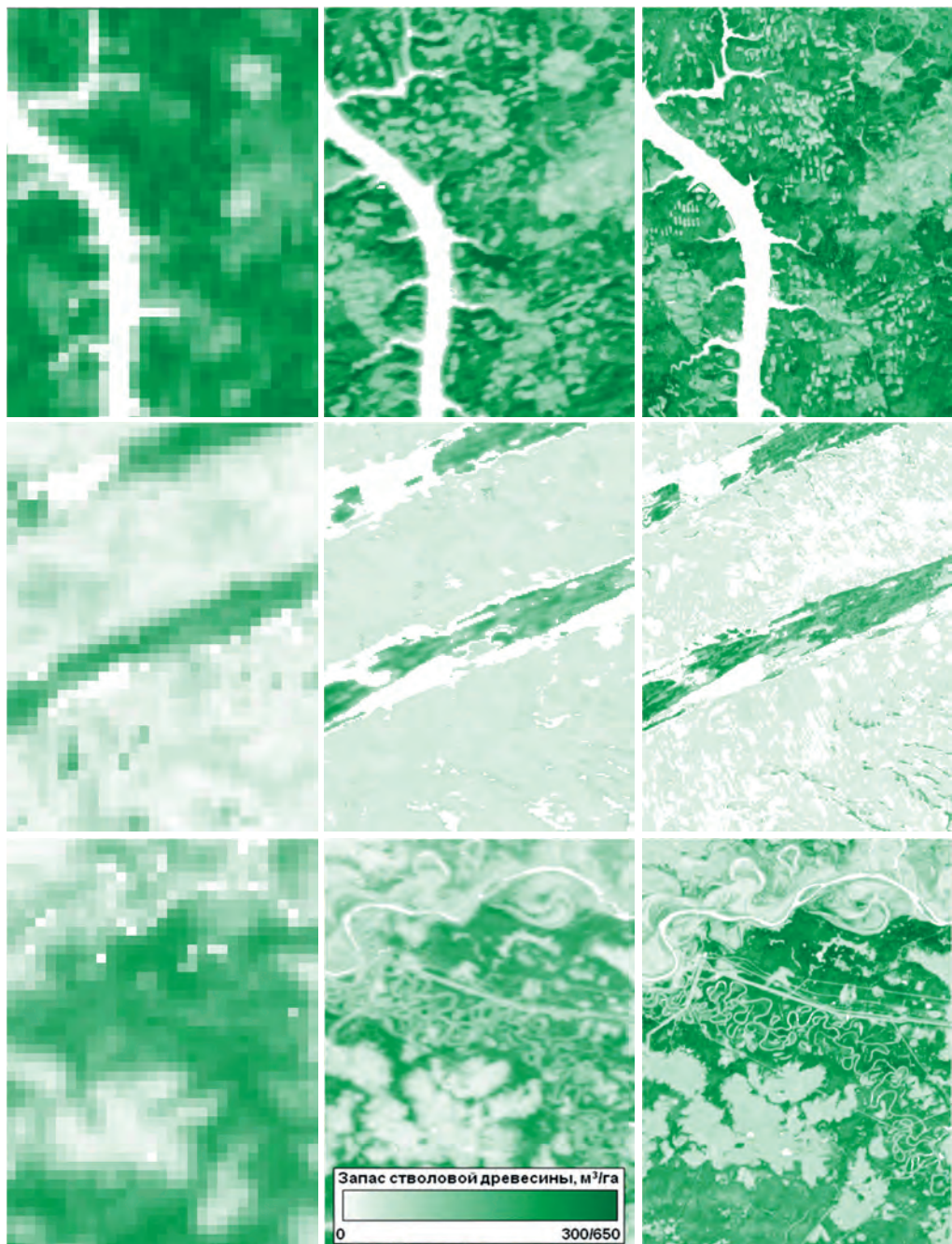


Рис. 4.19. Сравнение карт запасов древесины в лесах по данным BIOMASAR (1 км, слева), MODIS (250 м, в центре) и Proba-V (115 м, справа)

4.5. Спутниковое картографирование сельскохозяйственных земель на основе временных рядов данных ДЗЗ

Спутниковые данные широко используются для выявления и мониторинга сельскохозяйственных земель, а полученные на их основе глобальные карты применяются для прогнозирования урожая и мировых цен на продовольствие, являются важной составляющей информационного обеспечения исследований изменений климата. Информация о пространственном распределении пахотных земель представлена в глобальных картах земного покрова GLC2000, FAO GLC-Share, Globcover 2005/2009, GlobeLand30, MCD12Q1 (Bartholome, Belward, 2005; Latham et al., 2014; Defourny et al., 2009; Chen et al., 2015; Friedl et al., 2010). Кроме этого, существуют региональные карты различной тематической и пространственной детальности (FAO Africover, CORINE, JRC Cropland) (Vancutsem et al., 2012), несущие сведения о сельскохозяйственных землях. Такие карты могут, в частности, быть агрегированы для создания глобальных информационных продуктов (Waldner et al., 2016a). При этом национальные и региональные карты пахотных земель могут быть построены на основе различных подходов, учитывающих местные особенности и требования потенциальных пользователей.

В последние годы разработаны методы спутникового картографирования пахотных земель на национальном уровне, необходимыми предпосылками для чего стало наличие достаточно развитой инфраструктуры обработки больших объемов данных и сети наземных полигонов для валидации результатов. Эксперименты по оценке возможностей спутникового картографирования пахотных земель (Waldner et al., 2016b) выполнены при поддержке международной сети тестовых полигонов JECAM (<http://jecam.org/>) с участием научно-исследовательских организаций из Аргентины (INTA), Бельгии (UCL), России (ИКИ РАН), Китая (RADI) и Украины (SRI). Исследование возможностей и ограничений имеющихся методов классификации спутниковых данных ДЗЗ представляет интерес в контексте их потенциального использования для выявления пашни на больших территориях. Для объективного сравнения имеющихся методов использовался согласованный стандарт предварительной обработки спутниковых изображений, подготовки данных для обучения классификаторов и валидации результатов. Все методы использовали единый набор спутниковых данных (временные ряды недельных композитных изображений) Terra/Aqua-MODIS, прошедших предварительную обработку, исключаящую влияние облаков, теней от них и снежного покрова, а также идентичные опорные данные на каждый тестовый участок. Ниже представлено описание использованных методов распознавания пашни.

Метод анализа временных рядов и совместной классификации - TSAEC (INTA, Аргентина)

В основе метода анализа временных серий и совместной классификации TSAEC лежит анализ временных рядов данных MODIS с помощью программы Timesat, позволяющей оценивать фенологические характеристики растительного покрова с применением адаптивного фильтра Савицкого-Голая (Savitzky, Golay, 1964). Программа извлекает параметры динамики развития растений, включая начало и конец вегетационного периода, минимальное и максимальное значения

вегетационного индекса, время наступления его максимума и значение интеграла под кривой его динамики, углы наклона на восходящем и нисходящем ее отрезках. Параметры, извлекаемые из кривой динамики вегетационного индекса, используются в качестве признаков распознавания. К признакам применяют пять методов обучаемой классификации, включая метод максимального правдоподобия (Maximum likelihood), метод опорных векторов (SVM), деревья решений (Decision trees, DT), логистическая регрессия (LOGIT) и нейронные сети (NN). При этом обучающая выборка разбивается на две неравные по объему группы (подвыборки), используемые для калибровки и валидации методов. Во избежание недостаточной репрезентативности оценок случайным образом генерируются пять подвыборок (75% для калибровки и 25% для валидации) с последующим проведением 25 различных классификаций (5 методов по 5 повторений). Итоговая классификация в пикселе получается выбором класса, наиболее часто встречаемого во всех полученных реализациях.

Ансамбли нейронных сетей – NNE (SRI, Украина)

Метод нейросетевых ансамблей (NNE), разработанный в SRI, объединяет в себе использование необучаемой и обучаемой нейросетей для восстановления недостающих данных и классификации, соответственно. Сначала самоорганизующиеся карты Кохонена используются для восстановления измерений, пропущенных во временном ряду спутниковых данных вследствие влияния облачности и теней. Обучение проводится отдельно на данных каждого спектрального канала с использованием только свободных от шумов значений. Отсутствующие данные восстанавливаются с помощью процедуры, замещающей пропущенные компоненты весовыми коэффициентами нейронной сети (Latif et al., 2008; Skakun, Basarab, 2014). После восстановления пропущенных данных проводится обучаемая классификация временной серии изображений. Для этого используется группа нейронных сетей, в частности многослойных перцептронов (МСП), для улучшения работы каждого из отдельных классификаторов. МСП использует гиперболический тангенс в качестве функции активации для нейронов в скрытом слое и логистическую функцию активации для выходного слоя. Функция ошибки перекрестной энтропии используется для обучения и минимизируется с помощью сопряженного градиентного алгоритма, изменяющего весовые коэффициенты (Bishop, 2006). Выходные данные, полученные разными группами перцептронов, объединяются методом среднего (Meier et al., 2011), давая на выходе результат классификации. Такой подход применяется к временным сериям измерений в красном и ближнем ИК диапазонах прибора MODIS, используемых в качестве признаков классификации.

Классификация на основе деревьев решений – DT (RADI, Китай)

Метод распознавания пахотных земель на основе деревьев решений в качестве признаков классификации использует извлеченные из сглаженного фильтром Голая-Савицкого временного ряда *NDVI* четыре параметра, а именно значение максимума *NDVI*, среднее значение *NDVI* за сезон, скорость набора зеленой массы и скорость пожелтения (созревания). Кроме этого, дополнительно используется величина, характеризующая интенсивность сельскохозяйственного использования территории, связанная с количеством полученных из временной серии *NDVI* веге-

тационных сезонов в течение года. В случае двух сезонов вегетации признаки извлекаются только из данных, полученных в течение первого сезона. Дерево решений, использующее вычисленные параметры и обучающую выборку данных, создается с использованием алгоритма CART (Classification and Regression Tree).

Метод распознавания на основе априорной информации – KBC2, (UCL, Бельгия)

Метод распознавания на основе априорной информации (KBC2) представляет собой двухступенчатый алгоритм. Сначала выделяются пять фенологических метрик, основанных на предположениях о динамике развития культуры (Matton, 2015). Однолетние сельскохозяйственные культуры, как правило, (1) растут на открытой почве на месте предыдущего сбора урожая или подготовленной под сев почвы, (2) имеют более высокую скорость роста зеленой биомассы по сравнению с естественной растительностью, (3) имеют четко выраженный пик фотосинтетически активной биомассы, (4) демонстрируют резкое снижение зеленой биомассы при сборе урожая или созревании. Кроме того, поскольку открытая почва имеет высокие значения КСЯ в красном канале, даты его максимального значения также используются. Таким образом, временные ряды значений *NDVI* и КСЯ попиксельно анализируются для определения дат максимумов яркости в красном канале и минимумов *NDVI*, с одновременным извлечением максимальных значений производных на этапах возрастания и убывания *NDVI*. Далее применяется модифицированный метод опорных векторов (Vapnik, 2000) с использованием радиальной базисной ядерной функции и эмпирически определенными весами (Caputo, 2002).

Метод распознавания пашни на больших территориях – LSAM (ИКИ РАН, Россия)

Метод основан на использовании различий внутригодовой и межгодовой динамики спектрально-отражательных свойств пахотных земель и других типов земной поверхности (Bartalev et al., 2016). Метод использует признаки, построенные на основе многолетних рядов перпендикулярного вегетационного индекса *PVI*, учитывающие характерные отличия между естественной и сельскохозяйственной растительностью ввиду наличия на участках последней севооборота. Значение *PVI* рассчитывается в двумерном пространстве значений КСЯ красного и ближнего ИК диапазонов как евклидово расстояние от данной точки до линии почв. Значения *PVI* вычисляются с использованием уравнения линии почв по формуле $PVI(R_1, R_2) = -0,74R_1 + 0,67R_2 - 0,034$ (Плотников, 2012).

Приведенные в качестве примера на *рис. 4.20* временные ряды *PVI* получены для двух участков пашни и естественной растительности, находящихся в одинаковых почвенно-климатических условиях. Рисунок показывает, что многолетние ряды *PVI* имеют характерные особенности, позволяющие разработать признаки распознавания пашни. В частности, культурная растительность начинает свое ежегодное развитие позже естественной (ввиду посевных работ), интенсивнее развивается, достигая более высоких значений *PVI*, а по мере созревания теряет хлорофилл и убирается, как правило, раньше увядания естественной растительности.

В основу индекса кратчайшего сезона вегетации *SGPI* (*Shortest Growing Period Index*) в качестве признака распознавания пахотных земель положено наличие, в силу проведения агротехнических мероприятий (обработка почвы перед севом и

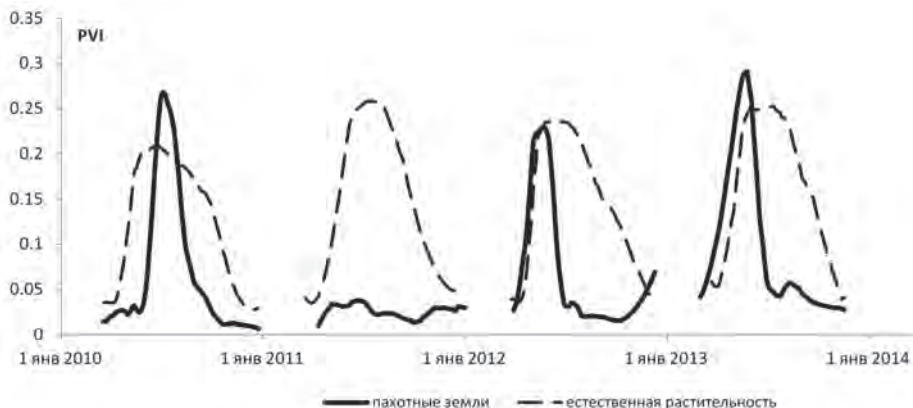


Рис. 4.20. Многолетние временные ряды PVI участков пашни и естественной растительности в одинаковых почвенно-климатических условиях

уборка урожая), тенденций к сокращению продолжительности вегетационного периода сельскохозяйственных культур по сравнению с естественной растительностью. Значения $SGPI$ рассчитывается как минимальный для ряда лет период, в котором значения PVI превышают порог, определяемый половиной максимального значения вегетационного индекса в текущем году (рис. 4.20):

$$SGPI = \min_{1..N}(t_L - t_F), \quad (4.11a)$$

где N – количество используемых лет, t_L и t_F – моменты времени, когда значения индекса равны половине величины сезонного максимума PVI_{max} , при этом момент t_L наступает после t_F :

$$PVI(t_L) = PVI(t_F) = \frac{PVI_{max}}{2} : t_L > t_F. \quad (4.11b)$$

Предпосылками для разработки и использования *индекса весеннего развития растительности CEMI (Crop Emergence Multi-year Index)* являются характерные для естественной и сельскохозяйственной растительности различия времени начала роста. В отличие от естественной растительности, время появления всходов на пахотных землях непосредственно связано со сроками сева, определяемыми в свою очередь состоянием почвы и ее готовностью к проведению посевных работ. Исключение составляют весенние всходы многолетних и озимых культур, которые уже имеют развитые с осени предыдущего года вегетативные органы. Таким образом, значения индекса $CEMI$, определяемого как минимальная многолетняя сумма значений PVI в границах временного окна, охватывающего весенний период года, имеют, как правило, более высокие значения на участках естественной растительности, чем на пахотных землях. Границы весеннего временного окна для этого индекса заключаются между 1 января и 15 июня каждого года (DOY 1 – DOY 167):

$$CEMI = \min_{1..N} \sum_{DOY=1}^{167} PVI, \quad (4.12)$$

где N – количество используемых лет.

Временной интервал спутниковых наблюдений, используемых для вычисления *индекса сезонного снижения фитомассы АММИ (Accumulated Minimum Multi-year Index)*, соответствует периоду вегетации культурной растительности, включая в себя моменты ожидаемого минимального покрытия почвы растительностью и, следовательно, низких значений *PVI*. Низкие значения могут соответствовать послеуборочной обработке почвы, укосам трав или предпосевным работам для возделывания озимых культур. Временное окно 20 мая – 1 сентября (DOY 140 – DOY 245) каждого года выбрано из предположения, что в этот период растительность успевает накопить существенный объём зелёной фитомассы.

$$AMMI = C - \frac{\sum_{t=1}^N PVI_{min}}{\sum_{t=1}^N PVI_{mean}}, \quad (4.13)$$

где N – количество используемых лет, PVI_{min} и PVI_{mean} – минимальное и среднее значение *PVI* в летнем окне текущего года, C – константа, обеспечивающая положительное значение индекса АММИ.

Изображения описанных признаков для территории с неоднородным ландшафтом, включающей сельскохозяйственные поля и естественную растительность, приведены на *рис. 4.21* совместно с гистограммами классов и значениями трансформированной дивергенции (Transformed Divergence). Изображения признаков демонстрируют достаточно четкие границы между классами пахотных земель и естественной растительности. Повышенная квантованность признака *SGPI* связана с расчетом длины вегетационного периода на основе семидневных композитных изображений.

Анализ пространственного распределения локальных значений признаков указывает на их заметную изменчивость для обоих классов (*рис. 4.22*), вызванную различиями почвенно-климатических и социально-экономических условий возделывания культур.

Необходимость учета пространственной изменчивости спектрально-динамических характеристик пахотных земель и естественной растительности обуславливает целесообразность использования метода локально-адаптивной классификации. Для картографирования пахотных земель России на базе описанных признаков распознавания использовался метод локально-адаптивной классификации *LAGMA* (Bartalev et al., 2014). При этом близость гистограммы локальных значений признаков к нормальному распределению позволила использовать для классификации метод максимального правдоподобия.

Описанный подход позволяет осуществлять ежегодное картографирование пахотных земель России (*рис. 4.23*). Результаты проведенной оценки точности карты свидетельствуют, что общая точность распознавания пахотных земель в различных регионах России варьирует в диапазоне от 80% до 98% (Bartalev et al., 2016; Bartalev и др., 2011б).

Метод *LSAM* продемонстрировал возможность получения устойчивых результатов при значительном многообразии почвенно-климатических и социально-экономических условий территории России. Вместе с тем его использование

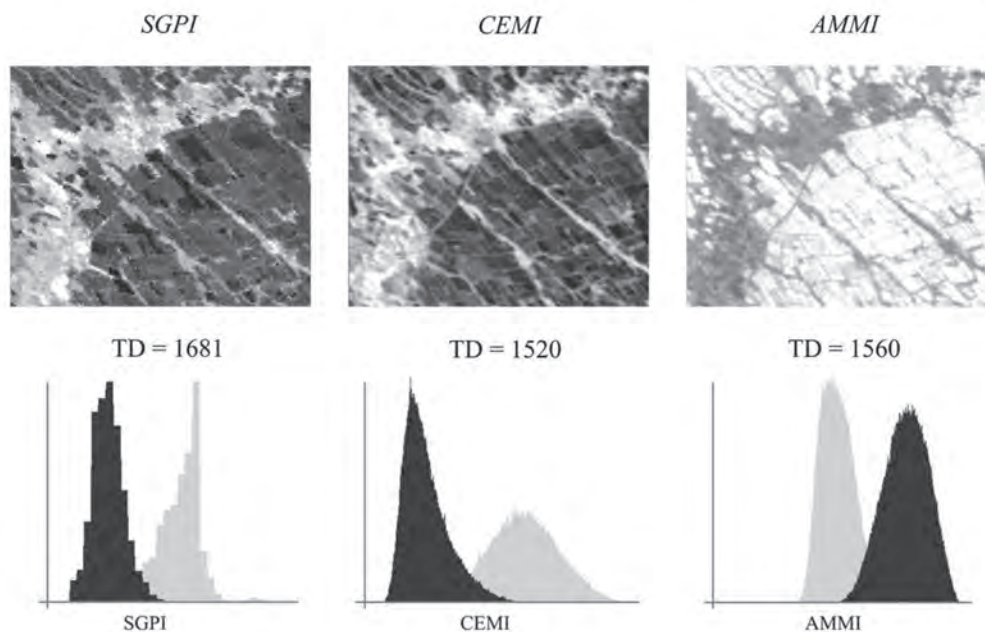


Рис. 4.21. Изображения признаков распознавания пашни и соответствующие им характеристики делимости классов

для глобального картографирования пашни может столкнуться с неучтенными ранее особенностями фенологического развития сельскохозяйственной растительности, не находящими отражения в разработанных спектрально-динамических признаках распознавания. В частности, для задействованных в эксперименте тестовых участков, расположенных на двух континентах двух полушарий (рис. 4.24), характерны полугодовые сдвиги сезонов развития культур, выращивание нескольких урожаев в течение года, особенности пред- и постпосевных работ, наличие местных культур в севообороте.

Единство наборов данных на тестовые участки обеспечило сравнимость результатов и возможность использования стандартного набора критериев оценки точности методов, включая общую точность классификации, точность распознавания по каждому из классов и метрику F-score. Использование спутниковых изображений высокого пространственного разрешения и наземных данных позволило построить детальную карту пахотных земель в качестве эталона для вычисления линии оптимума Парето (Boschetti, 2004).

При этом расположение результатов распознавания в пространстве ошибок первого и второго рода позволяет сопоставить различные методы, в частности, на основе критерия расстояния до линии Парето (рис. 4.25).

Расстояние до линии Парето указывает на то, как сильно отличается используемый метод распознавания от идеального, соответствующего линии Парето. Под идеальным понимается метод распознавания, не вносящий собственных ошибок в результат классификации. При этом отличие получаемых с использованием

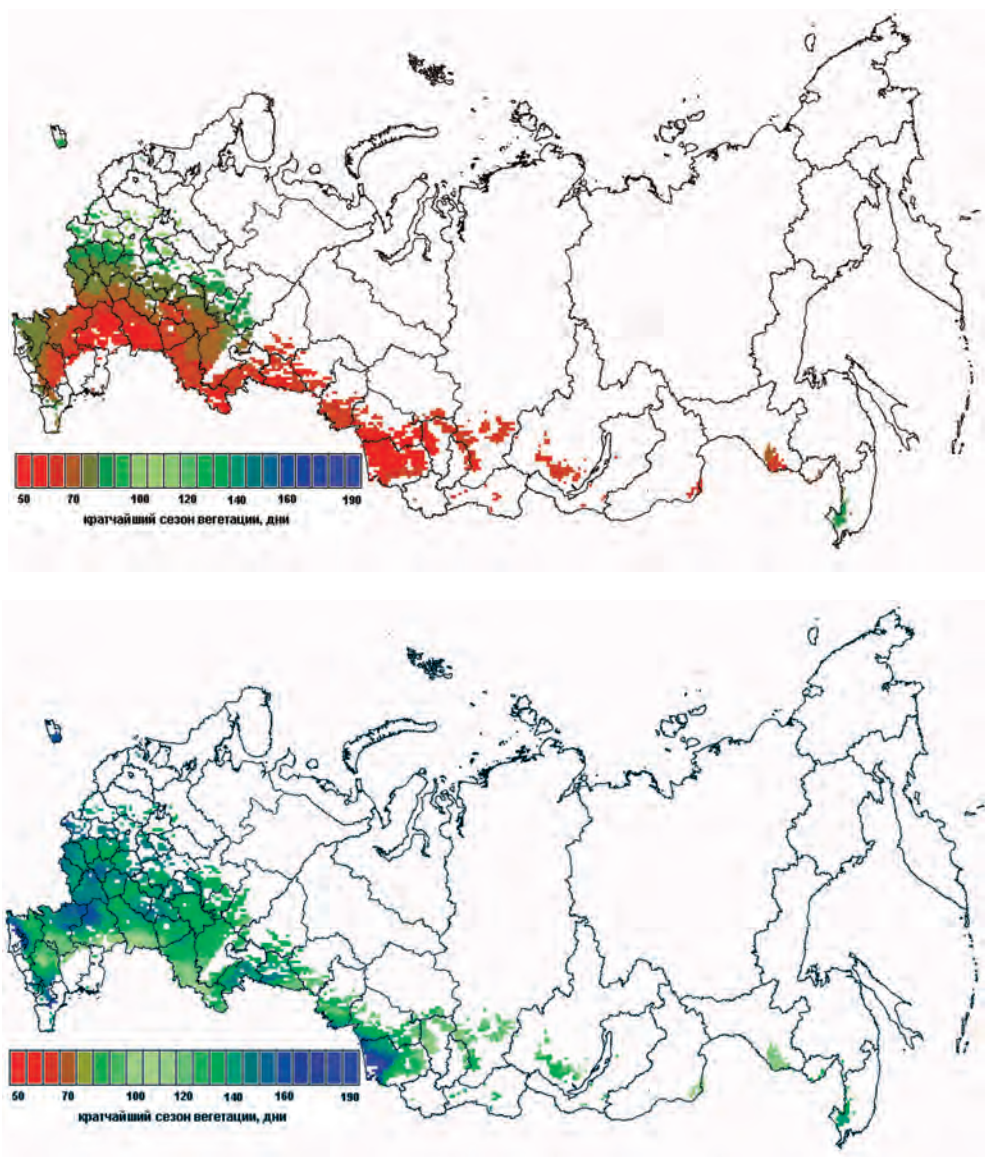


Рис. 4.22. Пространственная изменчивость индекса SGPI для пахотных земель (вверху) и естественной растительности (внизу). Оценка значения SGPI получена для клеток 25×25 км, в которых доля площади пахотных земель не ниже 5%.

идеального метода результатов распознавания от эталона объясняется только влиянием пространственного разрешения системы ДЗЗ. Таким образом, чем меньше расстояние до линии Парето, тем ближе метод к идеальному при данном пространственном разрешении. Анализируя *рис. 4.25*, можно отметить, что методы LSAM

и КВС2 для всех участков оказываются в первой тройке ближайших к оптимуму. Остальные методы демонстрируют нестабильность результатов, получаемых на разных тестовых участках, что свидетельствует о более низком потенциале их использования для глобального картографирования пахотных земель.

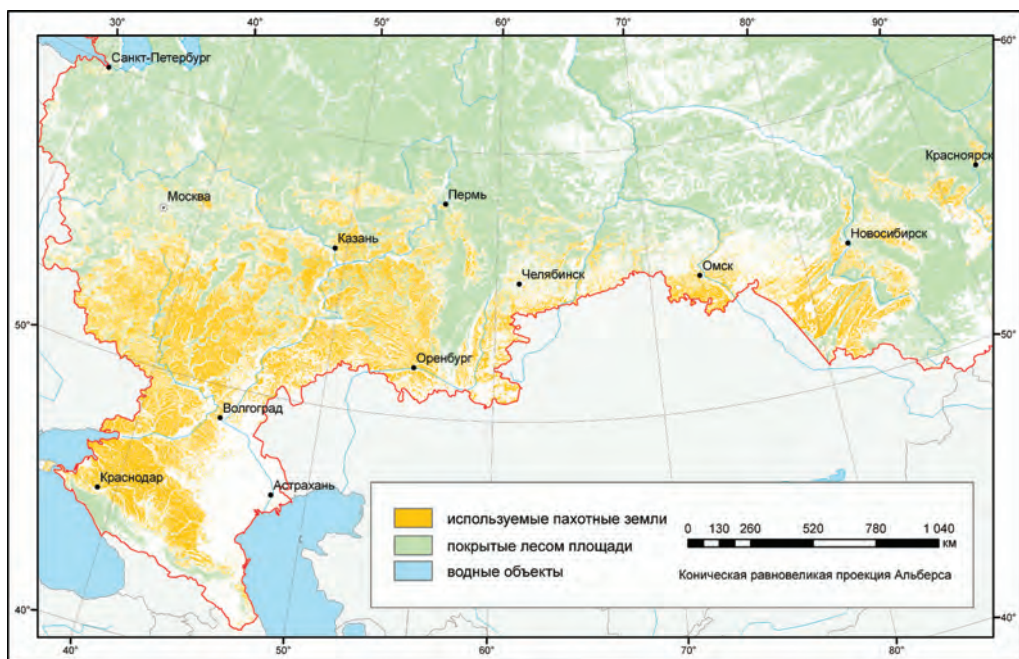


Рис. 4.23. Фрагмент карты используемых пахотных земель России по состоянию на 2013 год, полученной по данным MODIS

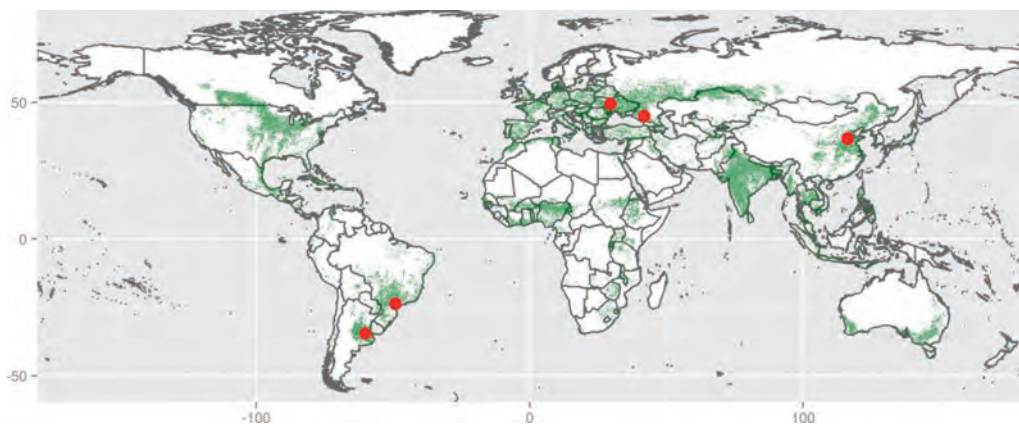


Рис. 4.24. Расположение тестовых участков сети JESAM (<http://jesam.org/>) для экспериментов по оценке возможностей спутникового картографирования пахотных земель

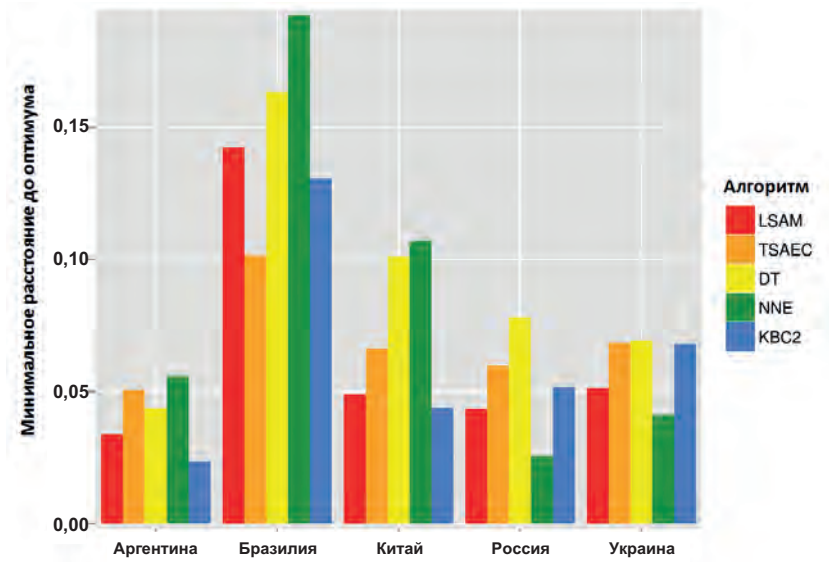


Рис. 4.25. Евклидово расстояние до линии оптимума Парето для каждого метода и тестового участка (меньшее расстояние соответствует более высокой точности)

4.6. Прогнозное моделирование динамики растительного покрова России на основе данных спутникового картографирования

Глобальные модели динамики растительного покрова (DGVM – Dynamic Global Vegetation Models) позволяют воспроизводить изменение характеристик растительности и процессы в ней на больших территориях с учетом их зависимости от условий окружающей среды (климат, почва, рельеф, состав атмосферы). Модели описывают процессы, происходящие в растениях (например, фотосинтез, транспирация, дыхание, размножение), и процессы их взаимодействия друг с другом и окружающей средой (конкуренция за воду и свет, водный баланс, возмущающие воздействия).

Глобальные модели динамики растительности часто используются в составе моделей геосистемы для прогнозирования изменения климата. Растительность оказывает влияние на альbedo поверхности и на потоки парниковых газов, воздействуя, таким образом, и на климат планеты. С другой стороны, изменение климата оказывает воздействие на характеристики растительности и ареал распространения различных ее видов. Все это приводит к необходимости использования глобальных моделей динамики растительности для оценки ее динамики в контексте изменения климата.

Примером глобальной модели динамики растительности в составе модели геосистемы может являться модель TRIFFID (Top-down Representation of Inter-

active Foliage and Flora Including Dynamics) (Cox, 2001). Эта модель была объединена с моделью атмосферы, моделью океана HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3) (Collins et al., 2001) и моделью углеродного цикла в океане HadOCC (Hadley Centre Ocean Carbon Cycle Model) (Palmer, Totterdell, 2001) для получения модели геосистемы (Cox et al., 2000). Данная модель геосистемы позволила построить прогноз содержания углерода в океане, атмосфере и растительности до 2100 года, оценить рост концентрации CO_2 в атмосфере и его влияние на температуру воздуха.

На данный момент существует несколько глобальных моделей динамики растительности, описывающих процессы в ней с разной степенью детальности, например LPJ (Sitch et al., 2003), TRIFFID (Cox, 2001), ORCHIDEE (Krinner et al., 2005). Данные модели способны адекватно воспроизводить наблюдаемую динамику растительности и связанные с ней потоки углерода (Sitch et al., 2008). В то же время эти модели по разному оценивают динамику растительности в будущем при различных климатических сценариях. Это различие особенно сильно проявляется для экстремальных сценариев изменения климата (Cramer et al., 2001; Sitch et al., 2008). Различие модельных прогнозов может объясняться различиями в формулировке уравнений процессов в растительности и в значениях их параметров. Разные значения параметров модели могут одинаково хорошо воспроизводить исторические данные и при этом давать большой разброс прогнозов. Ограничение возможного диапазона значений параметров требует использования большого объема данных реальных наблюдений за процессами в растительности при различных условиях на этапе построения и настройки моделей. Для глобальных моделей такие данные до недавнего времени основывались на агрегированных выборочных наземных исследованиях.

Данные ДЗЗ позволяют объективно оценить характеристики растительности на глобальном уровне. Например, полученные по данным ДЗЗ результаты картографирования растительного покрова позволяют оценить его пространственное распределение. Способность глобальных моделей динамики растительности адекватно воспроизводить ее пространственное распределение важна и для прогноза ее динамики. При этом многие модельные параметры, регулирующие возможный ареал произрастания типов растительности, заданы эмпирически по ограниченному набору данных наземных исследований. Спутниковое картографирование предоставляет новый подход к объективной оценке растительного покрова на больших территориях, и его результаты могут быть использованы для восстановления параметров моделей. Метод региональной настройки глобальной модели растительности разработан на примере модели SEVER (Venevsky, Maksyutov, 2007) с использованием спутниковой карты растительного покрова России (Барталев и др., 2011а).

Глобальная модель SEVER является примером современной модели динамики растительного покрова Земли. Она основана на известной модели LPJ (Sitch et al., 2003), от которой ее отличает возможность использования ежедневных климатических данных и улучшенный блок моделирования природных пожаров.

SEVER моделирует процессы в десяти функциональных типах растительности, включая хвойные и лиственные леса бореальной, умеренной и тропической климатических зон, тундровую и травянистую растительность на уровне клеток с про-

странственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ по широте и долготе. При этом в каждой из клеток независимо моделируется поведение среднего представителя каждого типа растительности, которое распространяется на всех его представителей в клетке. В начале моделирования SEVER создает популяцию каждого типа растительности во всех клетках и позволяет им развиваться до достижения равновесного состояния основных характеристик модели. После достижения равновесного состояния осуществляется процесс моделирования динамики растительности в каждой клетке по заданным климатическим данным.

С каждым типом растительности ассоциировано несколько его фракций – листья, корни, ствол (заболонь и ядро). Набор аллометрических уравнений определяет соотношения между запасами углерода (биомассы) разных фракций (типов тканей):

$$LA = k_{lasa} \times SA, \quad (4.14a)$$

$$C_{leaf} = lr_{max} \times w \times C_{root}, \quad (4.14б)$$

$$H = K_{allom2} \times D^{k_{allom3}}, \quad (4.14в)$$

$$CA = k_{allom1} \times D^{k_f}, \quad (4.14г)$$

где LA – площадь листа, SA – площадь ствола, C_{leaf}, C_{root} – биомасса листьев и корней соответственно, H – высота ствола и D – диаметр ствола, CA – площадь кроны, $k_{lasa}, lr_{max}, k_{allom1}, k_{allom2}, k_{allom3}, k_f$ – эмпирически определенные константы и w – коэффициент водного стресса.

Для определения продуктивности растения моделируется водный баланс, эвапотранспирация и водный стресс. Для моделирования водного баланса почва разделяется на два уровня глубины (0,5 м и 1 м). Содержание воды в почве на этих уровнях определяется осадками, таянием снегов, эвапотранспирацией, стоком и просачиванием вод в более глубокие слои. Эвапотранспирация рассчитывается как минимальная величина из значений доступного количества воды в почве E_{supply} и потенциального максимума количества воды, испаряемой в атмосферу E_{demand} :

$$AET = \min(E_{supply}, E_{demand}), \quad (4.15a)$$

$$E_{demand} = E_{pot} \times a_m \times (1 - \exp(-g_{pot} / g_m)), \quad (4.15б)$$

где E_{pot} – равновесное значение эвапотранспирации, зависящее от широты, температуры и продолжительности солнечного дня, g_{pot} – потенциальная транспирация растения при достаточном количестве воды и a_m, g_m – эмпирические параметры. Водный стресс определяется соотношением доступной и потребляемой воды $w = \min(1, E_{supply} / E_{demand})$.

Фенологическое состояние растений, определяемое по их типу, температуре и доступности воды, позволяет оценивать текущую площадь листьев относительно годового максимума. Для вечнозеленых типов листья всегда на максимуме эффективности, для листопадных лесов эффективная площадь листового покрова начи-

нает увеличиваться после превышения минимальной температуры и достигает максимума, когда сумма накопленных эффективных температур выше определенного порога. Также в случае сильного водного стресса считается, что все листья растения отмирают.

Модель воспроизводит процесс фотосинтеза с использованием подхода (Нахелтине, Прентис, 1996), основанного на предположении об оптимальности активности фотосинтеза в зависимости от затененности листа. Используя это предположение и учитывая поглощенную фотосинтетически активную радиацию, атмосферное давление и эффективную температуру, определяется продукция растения.

Продукция растения тратится, в первую очередь, на его дыхание. Затраты на автотрофное дыхание определяются по биомассе каждой ткани растения и температуре по формулам вида

$$R_{\text{tissue}} = r \times C_{\text{tissue}} / cn_{\text{tissue}} \times g(T), \quad (4.16a)$$

$$g(T) = \exp(308,56 \times (1/56,02 - 1/(T + 46,02))), \quad (4.16b)$$

где r – индивидуальный для каждого типа растений коэффициент, C_{tissue} – биомасса данной фракции, cn_{tissue} – коэффициент отношения содержания углерода к азоту для ткани, T – температура воздуха или почвы в зависимости от фракции.

Оставшаяся биомасса уходит на появление новых и на увеличение биомассы существующих растений. В случае если в результате прироста биомассы площадь крон древесных растений превысила размер клетки, часть растений каждого типа умирает в результате конкуренции за свет. Также смерть растений происходит в случае сильного температурного стресса или в случае негативного прироста биомассы за год.

Кроме того, каждый год часть тканей растения отмирает, процент умершей биомассы фиксирован и зависит от типа тканей и типа растения. Отмершая биомасса переходит в наземный опад, почву или ядро дерева. Набор уравнений определяет процесс разложения веществ в опаде и почве с последующим переходом углерода в более глубокие слои почвы или в атмосферу.

Для моделирования используются климатические данные NCEP (<http://www.spc.ncep.noaa.gov/>) за 1957–2006 годы, интерполированные до пространственного разрешения $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Данные о концентрации CO_2 и почве получены из тех же источников, что и в модели LPJ (Sitch et al., 2003).

Для оценки качества работы модели полученное на ее основе пространственное распределение типов растительности сравнивалось с картой растительного покрова России (Барталев и др., 2011а) (раздел 4.2). Карта растительного покрова была агрегирована на регулярную сетку с пространственным разрешением модели. Возможность визуального сравнения результатов моделирования и спутникового картографирования растительного покрова на уровне преобладающих типов дают *рис. 4.26* и *рис. 4.27*.

Для численной оценки качества моделирования использован подход, основанный на корреляции между пространственными распределениями значений доли типов растительности по модели и по результатам спутникового картографи-

рования. Принимая во внимание необходимость учета широтных различий площади клеток, корреляцию вычисляют по следующим формулам:

$$\bar{Y}_\omega = \frac{\sum_i \omega_i y_i}{\sum_i \omega_i} \quad \bar{X}_\omega = \frac{\sum_i \omega_i x_i}{\sum_i \omega_i}, \quad (4.17a)$$

$$\text{cov}(X, Y)_\omega = \frac{\sum_i \omega_i (x_i - \bar{X}_\omega)(y_i - \bar{Y}_\omega)}{\sum_i \omega_i}, \quad (4.17б)$$

$$\text{corr}(X, Y)_\omega = \frac{\text{cov}(X, Y)_\omega}{\sqrt{\text{cov}(X, X)_\omega \text{cov}(Y, Y)_\omega}}, \quad (4.17в)$$

где x_i, y_i – доли типа растительности в i -ой клетке площадью ω_i по карте растительного покрова и по данным модели соответственно. Суммирование происходило для клеток с отличными от нуля значениями x_i или y_i , а в качестве общей оценки качества моделирования использовалась сумма квадратов корреляций для всех типов растительности.

Первичный анализ критерия качества работы модели показал, что модель неточно моделирует пространственное распределение типов растительности на территории России, в связи с этим была осуществлена предварительная настройка параметров модели. Полученное в итоге распределение типов растительности представлено на *рис. 4.26в*. Оценка корреляции для каждого из типов растительности и общий критерий качества представлены в *табл. 4.6*. Видно, что значения коэффициентов корреляции низки для всех типов растительности и практически равны нулю для мелколиственных лесов.

Таблица 4.6. Значения коэффициентов корреляции и критерия качества на разных этапах адаптации модели динамики растительного покрова

Тип растительности	Хвойные вечнозеленые леса	Хвойные листопадные леса	Мелколиственные леса	Травянистые экосистемы и тундра	Критерий качества
Исходная модель	0,48	0,39	0,0	0,34	0,50
Предварительная настройка	0,51	0,48	0,19	0,33	0,63
Коррекция по высоте	0,38	0,52	0,26	0,25	0,54
Конкуренция за свет	0,41	0,52	0,30	0,25	0,59
Имитация тундры	0,44	0,63	0,35	0,29	0,80
Итоговая модель	0,55	0,60	0,42	0,50	1,09

Было предложено несколько модификаций модели, направленных на повышение ее качества. Указанные модификации модели включали в себя доработку ал-

горитма учета конкуренции за свет между видами, внедрение имитации тундровых экосистем и дополнительную коррекцию высотного градиента температуры воздуха.

На *рис. 4.26а, в* видно, что исходная версия модели SEVER неадекватно воспроизводит поведение горных экосистем. По данным спутниковой карты растительного покрова регионы Урала, Станового нагорья, Верхоянского хребта и других горных систем преимущественно представлены горной тундрой, в то время, как по данным модели они не отличаются от соседних равнинных территорий. Это может быть связано с тем, что используемые моделью климатические данные обладают грубым пространственным разрешением (около 2°), и не способны учесть резкие изменения в высоте земной поверхности и вызванные ими изменения в климате горных местностей. В связи с этим в метеоданные была введена дополнительная коррекция температуры воздуха на высоту местности над уровнем моря, основанная на оценке перепада значений высот в клетке и введении отрицательного температурного градиента, равного -0,6 °С на каждые 100 м перепада высот. Указанная величина температурного градиента использовалась в модели в качестве начального приближения данного параметра и в дальнейшем была оптимизирована. Уменьшение температуры воздуха с увеличением высоты над уровнем моря приводит к доминированию вечнозеленых и травянистых типов в горных регионах, что в большей степени соответствует фактическому распределению типов растительного покрова в горах, как это видно на *рис. 4.26г*.

Другой проблемой исходной модели SEVER является неправильное воспроизведение соотношения хвойных и широколиственных типов растительности в европейской части России. Как видно из *рис. 4.27 (II-в, III-в)*, хвойные типы преобладают в северной части региона, а широколиственные - в южной, но модель лишь частично воспроизводит это распределение (*рис. 4.27, II-а, III-а*). Данное различие может быть связано с некорректным моделированием конкуренции за свет между разными типами растительности, в котором не учитывается высота деревьев.

В качестве модификации в модель SEVER был добавлен учет влияния высоты растений при их конкуренции за свет. Так, при определении доли растений, умерших в результате конкуренции за свет, ее прирост для каждого типа растительности умножался на коэффициенты вида:

$$\omega_i = A \frac{(h_i - \bar{h})}{\bar{h}}, \quad (4.18)$$

где A равно 10 (в дальнейшем это значение также было оптимизировано), h_i — высота среднего индивида для данного типа и \bar{h} — средняя высота для всех типов растений в клетке. Введение указанных коэффициентов значительно увеличивает долю более высоких и лучше приспособленных растений в клетке модели. Данная модификация модели привела к существенному изменению в моделируемом распределении типов растительности (*рис. 4.27, II-б, III-б*), повышая уровень его соответствия результатам спутникового картографирования.

Также из *рис. 4.26а, г* можно отметить, что модель SEVER недооценивает ареал тундры на севере и северо-востоке России. Тундра не присутствует в явном виде среди типов растительности модели и относится к травянистым видам растительности. В связи с недооценкой ареала распространения тундры в модель SEVER была включена имитация условий произрастания тундровой растительности путем

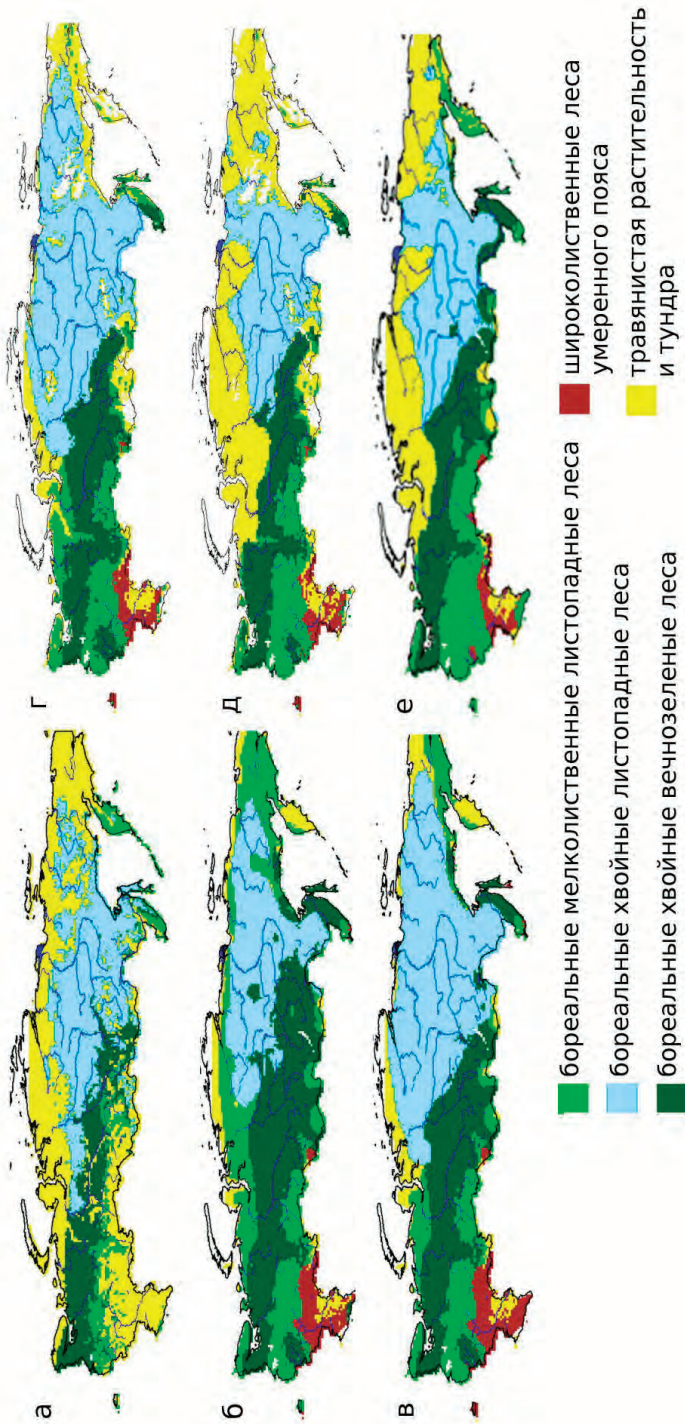


Рис. 4.26. Преобладающий тип растительности по данным (а) карты растительного покрова, (б) исходной модели, (в) предварительно скорректированной модели, (г) модели с коррекцией температуры воздуха по высоте, (д) модели с имитацией тундры, (е) параметризованной модели

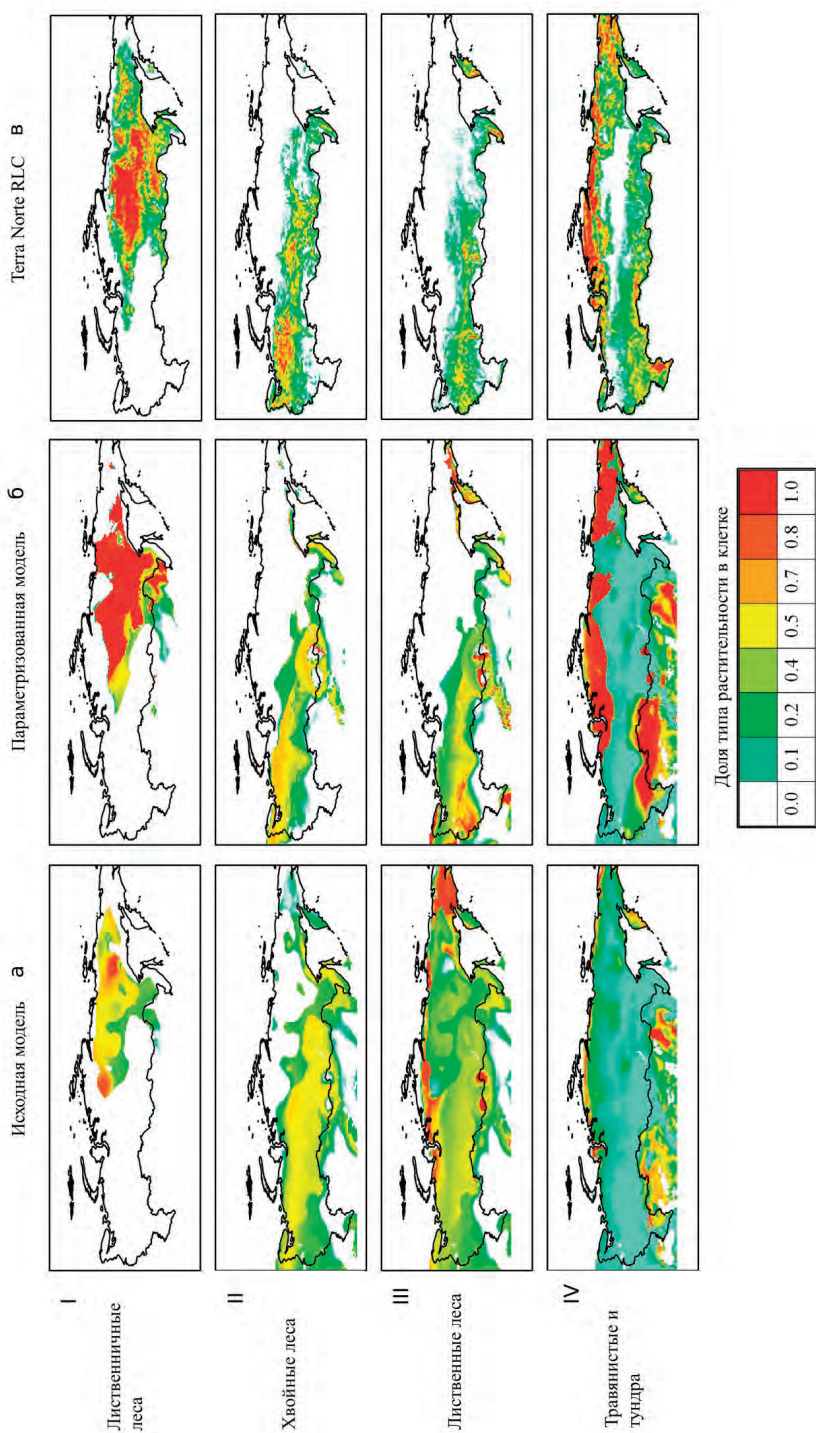


Рис. 4.27. Доля типов растительности в каждой клетке регулярной сетки по данным спутниковой карты растительного покрова России (TerraNorte RLC), результатам применения исходной и оптимизированной версий модели SEYER

добавления нечетких ограничений на параметры минимальной температуры, максимальной скорости ветра и максимальной глубины снежного покрова за год, имеющие следующий вид:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < X_{\min} \\ \frac{(x - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}, & X_{\min} \leq x \leq X_{\max} \\ 1, & x > X_{\max} \end{cases} \quad (4.19)$$

где x – параметр, а X_{\max} и X_{\min} – указанные в *табл. 4.7* минимальные и максимальные значения для каждого из параметров.

Клетка модели относилась к тундре в случае, если функция $\Pi = f(x_{\text{макс.ветер}}) \times (1 - f(x_{\text{мин.температура}})) \times (1 - f(x_{\text{макс.снеж.покров}}))$, состоящая из произведений функций-ограничений для отдельных параметров, превышала пороговое значение в 0,5. Представленные в *табл. 4.7* значения параметров получены путем оптимизации, направленной на минимизацию различий между пространственным распределением тундровой растительности согласно модели SEVER и спутниковой карте растительного покрова. С учетом приведенного выше усовершенствования, доля клеток с правильным воспроизведением моделью тундровой растительности на территории России выросла до 60% (*рис. 4.26д*). Стоит отметить, что верхнее ограничение на глубину снежного покрова оказалось равно 10 см, то есть условие по глубине снежного покрова свелось к условию наличия снега. Это может быть связано с неточностями в модельной функции, отвечающей за вычисление глубины снежного покрова.

Таблица 4.7. Граничные значения параметров окружающей среды для имитации в модели SEVER условий произрастания тундровой растительности

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Максимальная глубина снежного покрова, м	0	0,1
Минимальная температура воздуха, С°	-12,2	-35,4
Максимальная скорость ветра, м/с	1,875	5,46

Совокупность описанных выше усовершенствований модели SEVER позволила существенно повысить качество моделирования (*табл. 4.6*). В частности, наиболее заметные улучшения наблюдаются для широколиственных и хвойных листопадных типов растительности. В то же время наблюдается некоторое снижение качества моделирования травянистых и хвойных вечнозеленых типов растительности, что может объясняться заданием на этом этапе неоптимальных значений параметров модели.

Для повышения точности работы модели была проведена региональная оптимизация ее параметров, наиболее существенным образом влияющих на пространственное распределение типов растительности. При выборе подлежащих оптими-

зации параметров модели предпочтение отдавалось параметрам, отличающимся простотой интерпретации и трудностью непосредственной оценки ввиду нечеткости физического смысла. В модели имеется несколько такого рода параметров, например, эмпирические ограничения на температуру воздуха, при которых в растительности могут происходить процессы, необходимые для существования и размножения данного типа. Параметры уравнений фотосинтеза, эвапотранспирации, водного баланса и других аналогичных модулей не включались в процедуру формальной оптимизации в силу хорошей их интерпретируемости из физических и химических соображений, возможности непосредственного определения объективными методами, а также ввиду их неочевидного влияния на пространственное распределение типов растительного покрова. Кроме того, при выборе оптимизируемых параметров учитывались результаты предварительно проведенной оценки чувствительности критерия качества моделирования к независимому варьированию их значений.

С учетом приведенных выше соображений был выбран список из 12 параметров модели, девять из которых описывают климатические условия для различных типов растительности, при выходе за границы которых они не могут размножаться или погибают. Кроме того, использовались параметры модели, характеризующие площадь листовой поверхности для лиственных лесов, коэффициент в формуле конкуренции за свет и зависимость температуры от высоты над уровнем моря. Два последних параметра выбраны в связи с тем, что их исходные значения были заданы произвольно на этапе усовершенствования модели SEVER.

Оптимизации параметров модели была выполнена в два этапа разными методами. На первом этапе применен эвристический метод глобального поиска оптимума, использовавший для ускорения выборочную оценку точности модели. Затем для модели с полной оценкой точности осуществлен поиск локального оптимума, в качестве стартовой точки которого использовался найденный на предыдущем шаге глобальной оптимум. Для реализации обоих этапов оптимизации использовался язык R (R Core Team, 2015).

На первом шаге оптимизации нахождение глобального оптимума модели выполнялось с использованием метода EGO (Efficient Global Optimisation) (Jones et al., 1998), реализованного в языке R в составе пакета DiceOptim (Roustant et al., 2012). Указанный метод сочетает поиск оптимального значения параметров с исследованием пространства параметров через аппроксимацию методом кригинг (Simpson et al., 2001), заменяющим аппроксимируемую функцию суммой полиномиальной и случайной компонент. Сначала алгоритм EGO на основе набора исходных точек строит аппроксимацию и находит ее оптимум для значения критерия ожидаемого улучшения, характеризующего неопределенность аппроксимации в точке и ее близость к оптимуму. После нахождения точки, дающей максимальное значение критерия ожидаемого улучшения, подсчитывается фактическое значение исходной функции, и аппроксимирующая функция обновляется. Итерации повторяются до тех пор, пока улучшение значения критерия не достигнет предопределенного порогового значения. Такая структура метода повышает его быстродействие (за счет поиска оптимума по аппроксимации) и эффективность для глобальной оптимизации (из-за специфической формы критерия). Тем ни менее, так как время работы модели для всей территории России составляет несколько часов,

то полный поиск глобального оптимума модели методом EGO может потребовать более месяца. В связи с этим на первом этапе оптимизации использовалась выборочная оценка качества работы модели.

При выборочной оценке точности моделирование выполнялось для небольшой (5%) части клеток на территории России, а оценка качества моделирования строилась по этим клеткам так же, как и для полного набора клеток. Сравнение значений критерия качества модели, полученной с помощью выборочной и полной оценок, показало, что они имеют существенное отклонение примерно на 10%, но при этом величина коэффициента детерминации составила 0,88. Высокий уровень корреляции между значениями критерия качества моделирования при использовании различных подходов оценки может служить обоснованием замены метода оценки точности при исследовании пространства параметров модели. Однако, в силу того, что значения критериев для двух подходов различны, оптимум для выборочной оценки качества модели может не совпадать с оптимумом для полной оценки ее точности.

Таким образом, найденный на первом этапе глобальный оптимум модели может на самом деле не являться даже локальным оптимумом, что приводит к необходимости проведения второго этапа оптимизации модели. На втором этапе оптимизации осуществляется поиск локального оптимума модели с помощью квазиньютоновского алгоритма BFGS.

Использована реализация метода BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno) в функции `optim()` стандартного пакета `stats` языка R. Метод BFGS – широко известный квазиньютоновский алгоритм оптимизации, использующий градиент оптимизируемой функции (вычисляемый напрямую) и ее Гессиан (который аппроксимируется по ранее пройденным точкам функции). Этот алгоритм изменяет значения параметров функции в направлении уменьшения градиента, также используя данные о выпуклости (вогнутости) исходной функции (Гессиан). В данном случае информация о градиенте модели отсутствовала, поэтому была использована конечная аппроксимация градиента. Этот метод оценки градиента для модели требует существенного времени на выполнение, поэтому второй шаг оптимизации включал небольшое число итераций.

Первый шаг параметризации, основанный на алгоритме глобальной оптимизации EGO, потребовал свыше 1250 вычислений выборочной оценки точности модели. При использовании полной оценки точности модели этот этап потребовал бы свыше трех месяцев компьютерного времени, что подтверждает ранее сделанное предположение о практической невозможности реализации данного этапа на основе полной оценки точности модели. После выполнения данного шага оптимизации критерий качества моделирования (сумма квадратов пространственных корреляций) увеличился на 33%, а именно с 0,80 до 1,06.

Второй этап параметризации модели, основанный на методе BFGS и использовавший полную оценки точности модели, был выполнен за 161 итерацию и позволил достичь локального оптимума модели с дополнительным повышением значения критерия качества моделирования с 1,06 до 1,09.

Полученные значения параметров приведены в *табл. 4.8*. Результаты оценки точности модели SEVER после ее модификации и параметризации приведены в *табл. 4.6* и на *рис. 4.26*.

Таблица 4.8. Список параметров модели и их значений на разных этапах настройки

Параметр	Исходное значение	Визуальная коррекция	Оптимизация
Индекс континентальности лиственницы	43	40	36,6
Мин. температуры самого холодного месяца для широколиственных лесов умеренного пояса, С°	-17	-17	-18,9
Мин. температуры самого холодного месяца для мелколиственных лесов, С°	-50	-28	-24,4
Мин. температуры самого холодного месяца для бореальных хвойных листопадных лесов, С°	-50	-50	-42,5
Мин. температуры самого холодного месяца для бореальных хвойных вечнозеленых лесов, С°	-32,5	-28	-27,3
Макс. температуры самого холодного месяца для бореальных хвойных вечнозеленых лесов, С°	-2	-8	-0,5
Макс. температуры самого холодного месяца для мелколиственных лесов, С°	-2	-8	-12,8
Макс. температура самого жаркого месяца для бореальных хвойных вечнозеленых лесов, С°	23	23	24,5
Макс. температура самого жаркого месяца для мелколиственных лесов, С°	23	23	22
Коэффициент снижения температуры для каждого км разницы высот, С°/км	0	6	0,011
Коэффициент конкуренции за свет (А)	1	10	9981,65
Множитель индекса листовой поверхности лиственницы	1	1	0,69

Из *табл. 4.6* видно, что итоговая версия модели дает значительное увеличение значений коэффициента корреляции для всех типов растительного покрова. При визуальном сравнении (*рис. 4.26а, е*) наглядно видно, что дополненная и параметризованная модель более достоверно воспроизводит географическое распределение тундровой растительности и лиственничных лесов, а также дает более адекватную оценку соотношения между хвойными и лиственными лесами на западе страны. Вместе с тем, остаются нерешенными проблемы ошибок моделирования травянистой растительности на юго-западе России и растительного покрова в горных регионах.

Наибольшей (хотя и ожидаемой) проблемой первого этапа оптимизации явилось большое число итераций модели. Кроме того, в качестве проблемы необходимо также отметить поиск точек оптимума критерия ожидаемого улучшения, так как по мере увеличения числа точек, по которым строилась аппроксимация, также растет и время подсчета аппроксимированного значения функции. Таким образом, время поиска оптимума ожидаемого улучшения линейно увеличивалось

по ходу оптимизации и для последних итераций было сравнимо со временем выборочной оценки точности модели.

Для второго метода основной трудностью являлся подсчет аппроксимации градиента. Использование методов автоматического дифференцирования могло бы значительно увеличить скорость выполнения этого шага, но особенности программной реализации затруднили использование подобных методов.

Полученная в итоге настроенная модель SEVER учитывает ряд важных процессов и явлений в наземных экосистемах России, показывая хорошее соответствие между модельными оценками и результатами спутникового картографирования растительного покрова России, что позволяет рассматривать ее в качестве инструмента долгосрочного прогнозирования изменений растительного покрова.

Устойчивость поведения модели была проверена путем оценки изменчивости ее поведения в зависимости от малых вариаций ее параметров. Модель воспроизводила актуальное состояние растительности России при вариации одного параметра на +/- 10% от их оптимального значения (или +/- 0,5 °C для температурных параметров). Анализ относительного изменения площадей, занятых разными типами растительности, и значения критерия качества показал, что для всех вариаций параметров относительные изменения площадей и критерия не превысили 10%, и в большинстве случаев составили менее 5%. Малая изменчивость в поведении модели при малых вариациях ее параметров может служить доказательством ее устойчивости.

Прогнозирование изменения растительности России на ближайшее столетие вперед осуществлялось для четырех сценариев изменения концентрации парниковых газов в атмосфере, предложенных Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК, англ. IPCC) – RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 (Moss et al., 2010). Каждый из сценариев RCP (Representative Concentration Pathways) соответствует такому изменению концентрации парниковых газов в атмосфере, что в среднем поглощение солнечного излучения увеличится на 2,6–8,5 Вт/м² в зависимости от сценария. Прогноз изменения климата для всех четырех сценариев был получен по данным модели земной системы HadGEM-2-ES (Jones et al., 2011). Стоит отметить, что использование заранее подсчитанных климатических данных не позволило учесть обратное влияние изменений в растительном покрове на атмосферу, океан и динамику климата планеты. Данные о плотности населения (используемые при прогнозировании пожаров) и типе почв считались неизменными в течение следующего столетия.

Результаты прогнозирования показывают значительное изменение пространственного распределения преобладающих типов растительного покрова в будущем столетии для всех возможных сценариев (рис. 4.28). В связи с возможным глобальным потеплением климата для всех сценариев характерно существенное уменьшение площади хвойных вечнозеленых бореальных лесов России и менее значимое уменьшение площади бореальных широколиственных и лиственных лесов (рис. 4.29). Эти леса будут преимущественно заменены широколиственными листопадными лесами умеренного пояса, а также, в меньшей степени, травянистыми типами растительности. Стоит также отметить, что во всех сценариях на севере и северо-западе России широколиственные леса заменяют хвойные вечнозеленые в роли доминантного типа растительности (рис. 4.28). Область преобладания хвойных лесов к концу столетия во всех сценариях сокращается

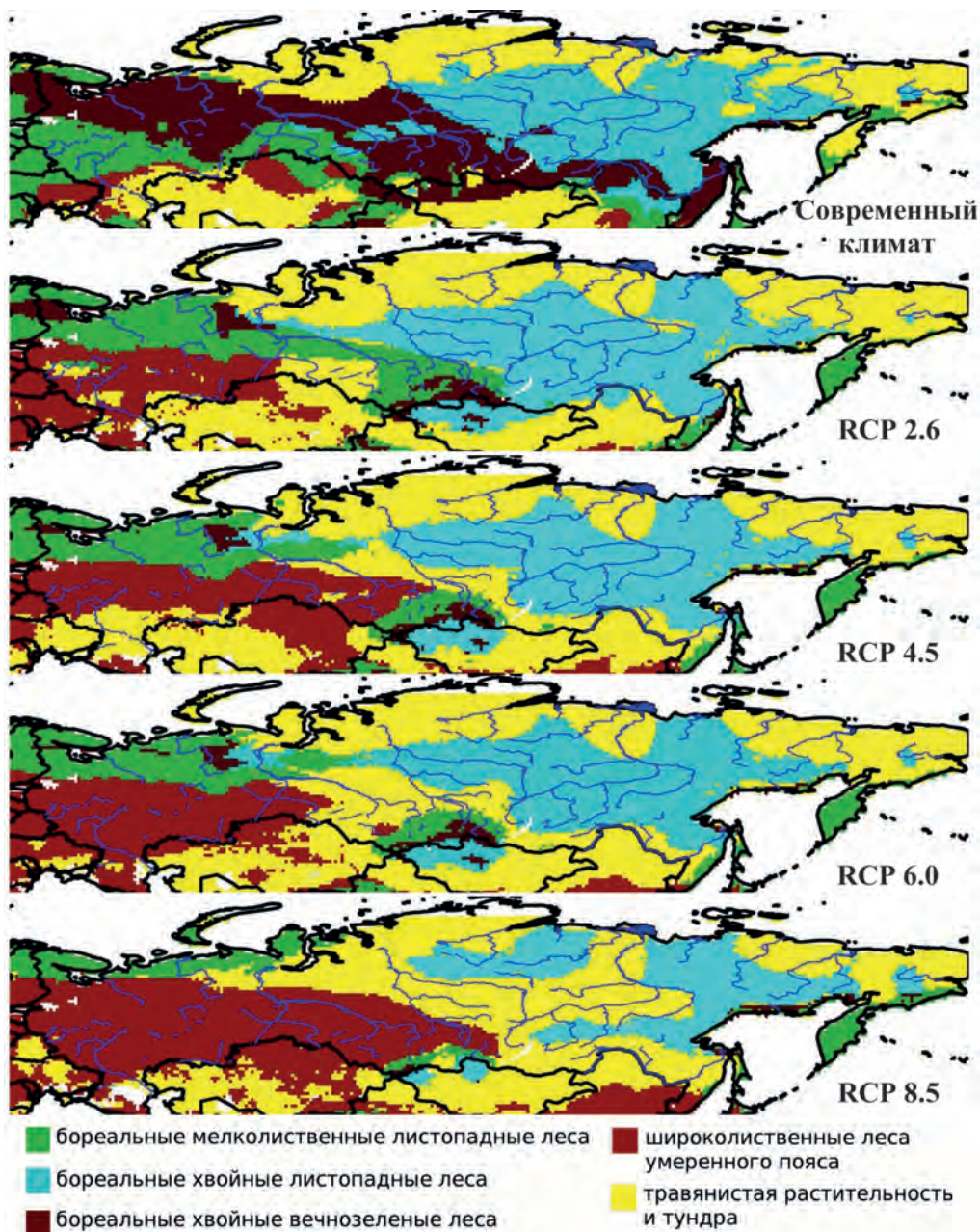


Рис. 4.28. Преобладающий тип растительного покрова по результатам моделирования для современного климата и по состоянию на 2100-й год для различных сценариев изменения климата – RCP (Representative Concentration Pathways) 2.6–8.5

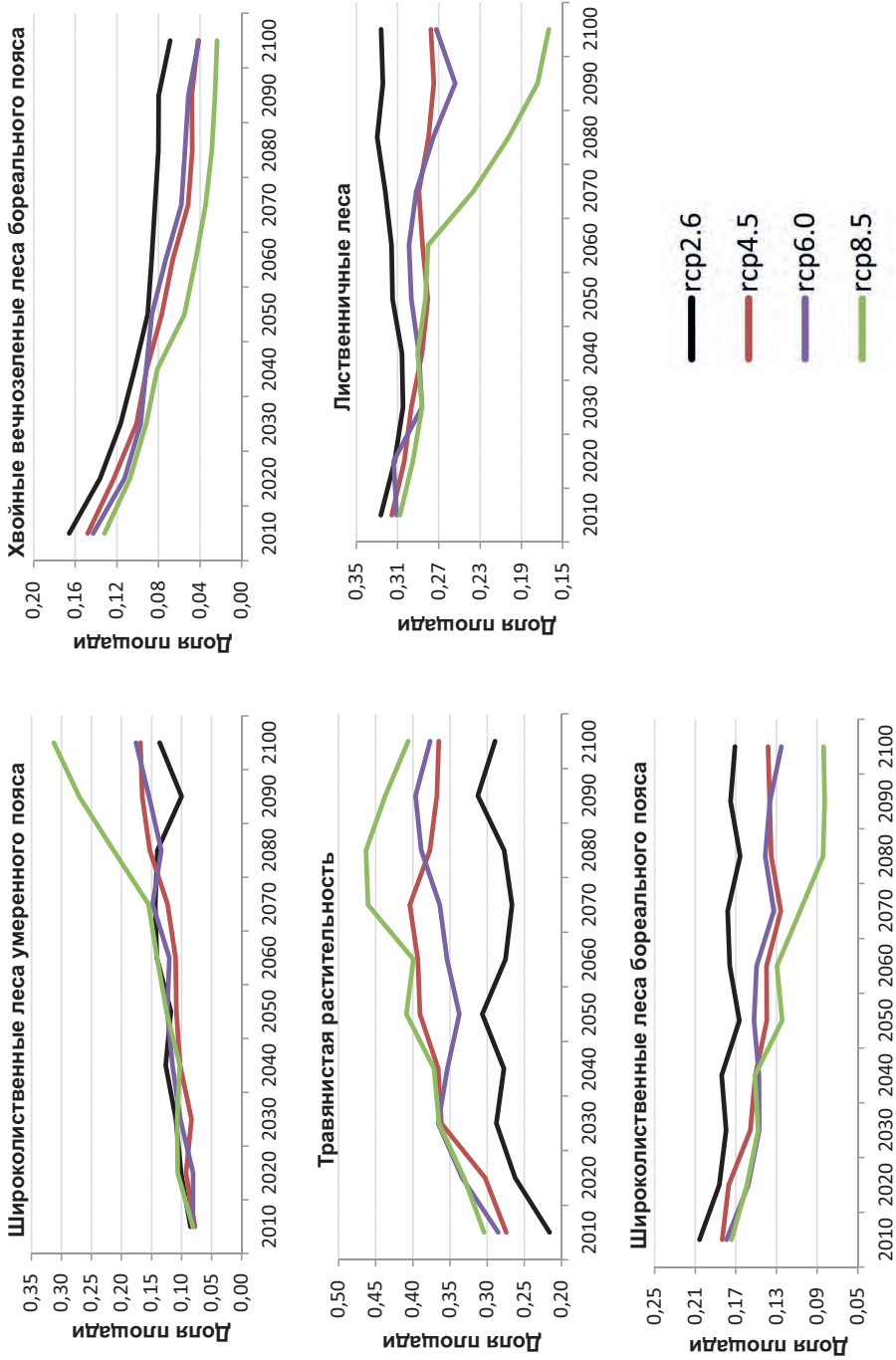


Рис. 4.29. Динамика доли площади основных типов растительности относительно площади территории России для разных сценариев изменения климата – RCP (Representative Concentration Pathways) 2.6–8.5.

в десятки раз, но при этом их ареал обитания уменьшается не более чем в два раза, существенно сокращается только доля их площади в модельной клетке в связи с неблагоприятными климатическими условиями.

Отдельно стоит выделить прогноз для наиболее пессимистичного сценария изменения климата RCP 8,5. В соответствии с этим прогнозом к концу текущего столетия может наблюдаться почти двукратное уменьшение площади лиственных и листопадных лесов бореального пояса, более чем двукратное уменьшение площади занимаемой ценными хвойными вечнозелеными породами. Согласно модельному прогнозу быстрое исчезновение лесов во второй половине XXI века сначала приведет к существенному увеличению площади, занимаемой травянистой растительностью, которая затем будет постепенно замещена широколиственными лесами умеренного пояса.

Стоит отметить, что модель воспроизводит динамику растительного покрова на основе моделирования усредненных индивидов от каждого типа растительности, равномерно распределенных в клетке моделирования. В связи с этим можно предположить, что модель переоценивает скорость смены типов лесного покрова по мере изменения климата России. На данный момент модель прогнозирует, что большая часть лесов бореального пояса будут заменены лесами умеренного пояса за 20–30 лет, но в действительности этот процесс может занять значительно больший промежуток времени.

Глава 5

ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕРВИСОВ АНАЛИЗА ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Стремительное развитие информационных технологий позволило разработать в последнее десятилетие новые инструменты использования спутниковых данных и результатов их обработки для исследования состояния и динамики растительного покрова. Одним из основополагающих условий для этого стал взрывной рост возможностей спутниковых систем наблюдения Земли и объемов поступающих от них данных (http://www.corporateservices.noaa.gov/nbo/fy13_presidents_budget/7_NESDIS.pdf, Ramapriyan, 2011). Одновременно сложились условия, стимулирующие развитие новых подходов к созданию систем и методов работы с данными ДЗЗ, к наиболее значимым из которых можно отнести:

- возросшее число спутниковых систем ДЗЗ, обладающих измерительными возможностями, т.е. обеспечивающих получение калиброванных (в широком понимании) данных измерений физических характеристик объектов, процессов и явлений;
- повышение общего уровня доступности спутниковых данных ДЗЗ, прежде всего, за счет все более широкого принятия дистрибуторами политики их свободного распространения;
- рост объемов данных ДЗЗ и повышение стоимости систем их приема и первичной обработки, приведший к усилению (наблюдающемуся с начала столетия) тенденции перехода от локальных систем приема данных к их получению из крупных специализированных центров;
- возникшая как следствие возросшей доступности и роста объемов данных ДЗЗ необходимость улучшения технологий их использования, в том числе за счет повышения уровня автоматизации их получения и обработки, оптимизации ведения архивов и использования распределенных вычислительных ресурсов;
- появление возможностей организации непрерывного мониторинга обширных территорий на основе данных ДЗЗ различного пространственного разрешения;

- появление технологических возможностей организации принципиально новых схем работы с распределенными сверхбольшими архивами данных и вычислительными ресурсами.

В настоящей главе рассмотрим основные особенности современных подходов к организации работы с данными ДЗЗ (Лупян и др., 2012в; Лупян и др., 2015а) и информационных сервисов дистанционного мониторинга растительного покрова, предоставляющих пользователям возможности получения данных и использования инструментов их распределенной обработки и анализа.

5.1. Современные технологии построения информационных сервисов использования спутниковых данных ДЗЗ

В России в последние годы активно ведутся разработки новых технологий работы со спутниковыми данными ДЗЗ для решения различных задач (Барталев и др., 2010; Лупян и др., 2011б; Ефремов и др., 2012; Лупян и др., 2012б). В настоящее время устоялась схема организации процессов обработки данных ДЗЗ (жизненный цикл), в соответствии с которой они проходят процедуры приема, архивации, первичной и тематической обработки (Лупян и др., 2004). В то же время если на первых этапах развития систем дистанционного мониторинга (СДМ) при их построении существовала необходимость реализации всех этапов обработки данных и создания специальной инфраструктуры, то современные технологии позволяют этого избежать за счет использования внешних информационных и вычислительных ресурсов.

Обобщенная схема построения СДМ представлена на *рис. 5.1*. Основной особенностью схемы является то, что в интересах СДМ создаются только блоки, обеспечивающие работу с данными ДЗЗ для решения характерных для системы задач, без дублирования информационных и технических возможностей центров сбора и обработки данных. Современные технологии позволяют задействовать ресурсы таких центров для построения блоков и подсистем СДМ, позволяя упростить их создание и поддержку при одновременном снижении ресурсоемкости. В интересах конкретной СДМ создаются следующие основные блоки и подсистемы:

- подсистема обработки данных;
- подсистема ведения архивов данных;
- подсистема представления и анализа данных;
- блок управления и контроля работоспособности системы.

В СДМ могут присутствовать и другие специальные блоки, отвечающие, например, за авторизацию и учет пользователей, контроль ресурсов, построение которых часто основано на типовых решениях. Ниже остановимся на особенностях перечисленных выше элементов СДМ в их взаимодействии с внешними техническими и информационными ресурсами.

Традиционно обработку данных ДЗЗ разделяют на два вида – первичную и тематическую. При этом в последние годы понятие первичной обработки данных ДЗЗ существенно расширилось (Лупян и др., 2004; Лупян, Саворский, 2012). В связи с ростом задач, решаемых с использованием данных ДЗЗ, и необходимостью по-

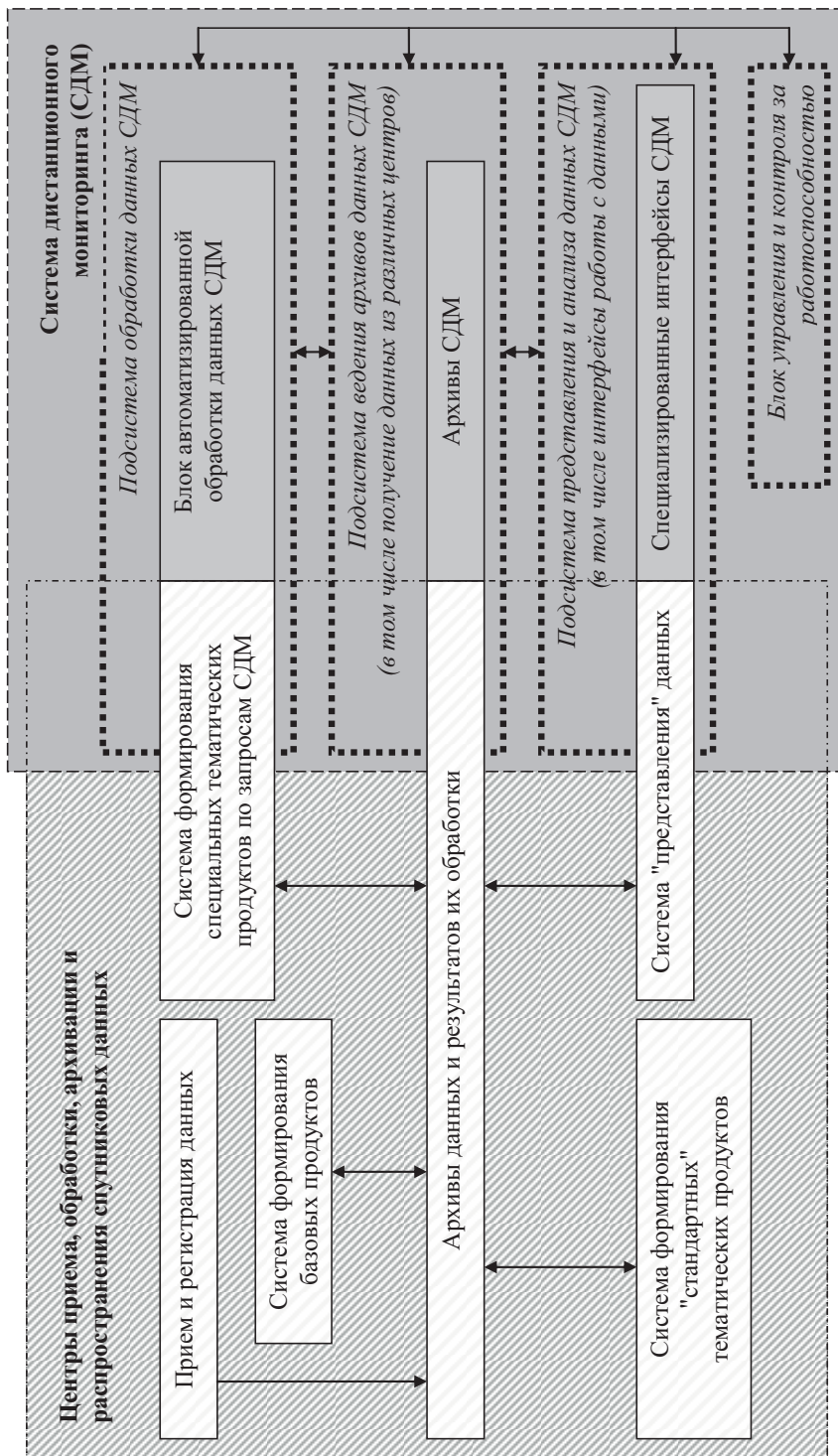


Рис. 5.1. Обобщенная схема построения систем дистанционного мониторинга

строения автоматизированных процедур их тематической обработки, к результатам первичной обработки данных предъявляются все более жесткие требования. Результатом первичной обработки данных должны быть базовые информационные продукты, обладающие высокоточной временной и географической привязкой, стабильной радиометрической калибровкой, коррекцией условий освещенности и состояния атмосферы. Должны обеспечиваться возможности получения очищенных от влияния облаков временных композитных изображений и однородных временных рядов данных ДЗЗ. При этом информационный продукт может быть востребован для решения различных тематических задач. В этой связи крупные центры приема и обработки спутниковых данных предоставляют все больше базовых информационных продуктов, сокращая тем самым необходимость реализации в СДМ функций первичной обработки данных ДЗЗ. При этом фокус внимания разработчиков в большей степени переносится на развитие функций обработки данных, ориентированных на получение тематических информационных продуктов для решения прикладных задач.

При разработке в СДМ блоков тематической обработки данных ДЗЗ продолжает усиливаться тенденция использования автоматизированных процедур, связанная с тем, что постоянно возрастающий поток данных ДЗЗ практически делает невозможной организацию их обработки без максимально полной автоматизации. При этом только на основе автоматизированных систем обработки данных возможно получение объективной и однородной информации. Основной задачей построения автоматизированных систем обработки данных ДЗЗ становится комплексирование процедур обработки, включающих формирование необходимых наборов данных, оптимизацию управления вычислительными ресурсами, управление последовательностью обработки данных и размещением результатов в архивах для дальнейшего использования.

К ключевым элементам СДМ относится подсистема архивации данных, фактически являющаяся связующим звеном различных блоков системы, а также подсистема представления и анализа информации. Можно выделить несколько рассмотренных ниже факторов, влияющих на технологии создания такого рода подсистем.

Во-первых, современные СДМ должны обеспечивать возможность использования данных ДЗЗ и инструментов их анализа распределенными пользователями, что приводит к необходимости создания web-интерфейсов в качестве ключевых элементов системы. Это накладывает ограничения на функциональность интерфейсов, но сопряжено с рядом неоспоримых преимуществ в сравнении с настольными приложениями (простота актуализации, отсутствие необходимости в значительном количестве лицензий и др.).

Во-вторых, разработанные в последние годы методы создания сложных инструментов распределенного анализа данных на основе Интернет-технологий во многом снимают имевшиеся ранее ограничения web-интерфейсов (Кашницкий и др., 2015а; Acker, Leptoukh, 2007; Moore, Hansen, 2011).

В-третьих, совершенствование технических возможностей обеспечения online доступа к внешним информационным системам, в том числе к ресурсам поставщиков данных ДЗЗ, позволяет работать в интерфейсах СДМ с информацией, получаемой из различных источников на момент запроса.

В связи с эволюцией подходов к созданию СДМ возникли и новые задачи технологий построения блоков управления и контроля работоспособности систем. Распределенная инфраструктура СДМ, рост числа источников данных, процедур их обработки и представления потребовали повышения уровня автоматизации контроля работоспособности систем, выявления и диагностики сбойных ситуаций.

Исходя из описанных выше блоков систем и сервисов работы с данными ДЗЗ развиваются рассмотренные ниже технологии (Лупян и др., 2004, 2011a, 2015a):

- технологии автоматизированного получения данных из специализированных центров;
- технологии автоматизированного ведения архивов данных;
- технологии автоматизированной обработки данных;
- технология представления данных и результатов их обработки пользователям;
- технологии контроля и управления элементами СДМ.

Технологии автоматизированного получения спутниковых данных. Современные подходы к организации использования данных ДЗЗ далеко не всегда сопряжены с необходимостью их физического размещения в архивах, а позволяют получать данные в режиме реального времени из архивов поставщиков. В то же время для проведения некоторых видов потоковой обработки данных в СДМ может возникать необходимость организации их получения от внешних поставщиков и размещения в архивах. В настоящее время не существует стандартов организации потокового предоставления спутниковых данных и результатов их обработки поставщиками, а разные центры могут использовать отличающиеся форматы их предоставления. В то же время основные этапы получения данных, как правило, однотипны и включают запрос сведений о наличии данных, формирование заказа на данные, контроль передачи данных и проверку корректности полученных данных, что позволяет унифицировать технологии их получения в СДМ от соответствующих центров (Балашов и др., 2013).

Технологии автоматизированного ведения сверхбольших распределенных архивов данных и результатов их обработки. В системах ведения таких архивов особое внимание уделяется вопросам организации блоков формирования так называемых виртуальных информационных продуктов, создаваемых динамически по запросу пользователей (Прошин и др., 2016).

Технологии автоматизированной распределенной обработки спутниковых данных. При создании СДМ остро стоит задача построения комплексных процедур потоковой обработки данных, включая организацию управления их работой и оптимизации использования ими вычислительных ресурсов. В этой связи возникает необходимость создания технологий поддержки множества процедур обработки, к которым предъявляются различные требования по оперативности выполнения и вычислительным ресурсам. Эти подсистемы должны быть рассчитаны на проведение потоковой обработки оперативно поступающих и исторических данных из распределенных архивов (Кобец и др., 2015б).

Технологии построения интерфейсов представления и анализа данных и результатов их обработки. Как уже отмечалось, современные СДМ предоставляют возможности распределенного получения и анализа информации с использованием

web-интерфейсов. Созданная в ИКИ РАН технология GEOSMIS (Толпин и др., 2011а; Бурцев и др., 2011) позволяет создавать картографические web-интерфейсы, обеспечивающие, в частности:

- работу с многомерными архивами данных с возможностью анализа пространственной и временной информации;
- простое и интуитивно понимаемое управление данными (выбор, поиск, отображение и т.д.);
- быстрый выбор информационных продуктов из архивов, обеспечивающих хранение многомерных данных;
- одновременное отображение различных видов данных для совместного анализа;
- работу с динамически формируемыми виртуальными информационными продуктами;
- возможность работы с распределенными информационными ресурсами;
- сервисы online обмена данными с внешними информационными системами;
- возможности разграничения прав доступа пользователей.

Основным направлением развития технологии стала реализация подходов, обеспечивающих возможности выбора и визуализации данных, их распределенной обработки и анализа пользователями с предоставлением им развитых инструментальных средств (Кашницкий и др., 2015а; Уваров и др., 2014; Кобец и др., 2015а).

Технологии контроля и управления элементами и ресурсами СДМ. В обеспечении функционирования современных СДМ задействованы сотни территориально распределенных компьютеров. Для контроля работоспособности и управления блоками СДМ требуется разработка специальных подходов и программного обеспечения. Разработанный ИКИ РАН программный пакет PMS (Process Monitoring System) предназначен для удаленного мониторинга работоспособности СДМ (Ефремов и др., 2004; Балашов и др., 2010б). Он позволяет контролировать процедуры обработки и архивации данных, оценивать качество обработки и обнаруживать сбои с информированием операторов, осуществлять мониторинг критически важных для системы параметров компьютеров (объем свободного места на дисках, загруженность процессоров и т.п.). При росте количества информации в СДМ необходима автоматизация контроля своевременного поступления различных данных, также осуществляемого на основе специальной технологии (Сычугов, Прошин, 2014; Балашов и др., 2011; Балашов и др., 2010б).

5.2. Организация работы с долговременными архивами данных ДЗЗ

Для эффективной работы с архивами данных в информационных системах дистанционного мониторинга требуются подходы, обеспечивающие возможность использования сверхбольших, распределенных и постоянно пополняемых архивов данных ДЗЗ. Одним из требований к системам ведения архивов данных ДЗЗ является поддержка работы с широким спектром данных, получаемых приборами с различными характеристиками (частота наблюдений, пространственное разрешение,

спектральные каналы и т.д.). Это, в свою очередь, порождает необходимость унификации схем ведения архивов разнородных данных.

Стремительный рост производительности систем ДЗЗ приводит к необходимости организации сверхбольших архивов данных. Развитие информационных технологий и сетевой инфраструктуры позволяет организовать доступ к распределенным архивам данных таким образом, что для пользователя практически не имеет значения место их физического расположения. В качестве примеров систем доступа к сверхбольшим архивам спутниковых данных можно привести web-порталы Google Earth Engine (Gorelick, 2013), EOSDIS (NASA) (Ramapriyan et al., 2010) и ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>), объединенную систему доступа к архивам данных центров приема НИЦ Планета (Антонов и др., 2010; Бурцев и др., 2012; Лупян и др., 2014а), центр коллективного пользования ИКИ-Мониторинг (ЦКП ИКИ-Мониторинг) (Лупян и др., 2015б), геопортал Роскосмоса (<http://gptl.ru/>) (Носенко, Лошкарев, 2010).

В последние годы изменились и требования по обеспечению доступа к данным. До недавнего времени специалисты в основном ориентировались на получение исходных данных для их использования в своих системах обработки. Сейчас возрастает интерес к получению информационных продуктов различного уровня обработки (Лупян, Саворский, 2012). При росте разнообразия продуктов, получаемых на основе одних и тех же исходных данных ДЗЗ, становится нецелесообразным их физическое хранение. В этой связи появились системы, осуществляющие формирование информационных продуктов в режиме offline (например, система NASA GIOVANNI, Acker, Leptoukh, 2007). С развитием аппаратного обеспечения актуальным становится предоставление доступа пользователям к виртуальным продуктам, т.е. продуктам, формируемым динамически в режиме реального времени.

Развитие технологий доступа к данным с предоставлением пользователям инструментов работы с ними привело к необходимости расширения функционала систем их хранения. В первую очередь это касается механизма доступа к виртуальным продуктам и поддержки инструментов обработки данных в режиме реального времени с использованием распределенных вычислительных ресурсов. Поддержка столь сложного функционала для большого числа неунифицированных распределенных архивов данных становится трудоемкой задачей. В этой связи актуальность приобретает задача унификации подходов к архивации спутниковых данных и организации доступа к ним. Для ее решения необходима разработка структуры БД, позволяющей эффективно работать с широким набором спутниковых данных и результатов их обработки. Кроме этого, требуется унификация механизмов ведения справочной информации о спутниках, приборах ДЗЗ, источниках данных, спутниковых данных и полученных на их основе продуктах. При реализации унифицированной системы ведения архивов необходимо предусмотреть специальные процедуры миграции в нее данных из действующих архивов.

Перечисленные особенности позволяют сформулировать следующие требования к организации современных унифицированных систем ведения архивов данных:

1. Использование унифицированной структуры БД для хранения данных, позволяющей обеспечить работу с широким набором разнотипных данных и результатов их обработки без существенного проигрыша в производительности;

2. Использование единой справочной БД, содержащей необходимую информацию, в том числе о центрах приема, спутниках, приборах, продуктах, включая виртуальные продукты и правила их построения;

3. Предоставление доступа к разнотипным спутниковым данным на основе унифицированного программного обеспечения, реализующего необходимый функционал, имеющийся в специализированных системах ведения архивов данных;

4. Поддержка единого для всех типов спутниковых данных механизма предоставления доступа к виртуальным продуктам, позволяющего гибко задавать правила получения новых продуктов на основе имеющихся данных;

5. Поддержка сервисов предоставления расширенных метаданных для инструментов анализа и обработки данных в режиме реального времени;

6. Унификация программного обеспечения ведения распределенных архивов при сохранении совместимости с существующими форматами поступления данных;

7. Реализация программных средств, обеспечивающих миграцию данных из существующих архивов.

Высокий уровень унификации систем ведения архивов данных ДЗЗ обеспечивает технология UNISAT (Прошин и др., 2016). Общая архитектура созданных на основе технологии UNISAT систем приведена на *рис. 5.2*.

Унифицированная структура БД UNISAT для хранения спутниковых данных. Разные типы спутниковых данных могут обладать разными атрибутами и быть представлены в виде разной логической структуры. Как правило, большая часть данных ДЗЗ в архивах организована в виде отдельных фрагментов изображений (сцен), обладающих набором атрибутов. В то же время хранение данных может быть организовано и в виде так называемых сеансов, состоящих из множества фрагментов с общими атрибутами. Несколько иначе устроены композитные продукты, организованные в виде фрагментов фиксированного пространственного разбиения. Для повышения скорости визуализации спутниковых данных используются пирамиды различных уровней пространственного разрешения. Структуры баз данных в специализированных системах ведения архивов существенно отличаются, в том числе и для достижения максимальной скорости получения информации. Требование унификации структуры баз данных привело к необходимости выработки компромиссного, но достаточно эффективного для работы с различными типами спутниковых данных решения (Прошин и др., 2016). Использование UNISAT показало, что технология позволяет реализовывать унифицированные архивы, сопоставимые по производительности с базами данных, оптимизированными для работы с конкретным типом информации.

Поддержка доступа к виртуальным информационным продуктам. В рамках унифицированной системы ведения архивов данных на основе UNISAT необходимая для виртуальных продуктов информация содержится в справочной БД. На основе сопоставления этой информации и данных о конкретных продуктах в архиве определяются формализованные правила получения виртуального продукта. Использование формализованных правил позволило реализовать универсальную программную компоненту, отвечающую за визуализацию реальных и виртуальных продуктов (Балашов и др., 2008).

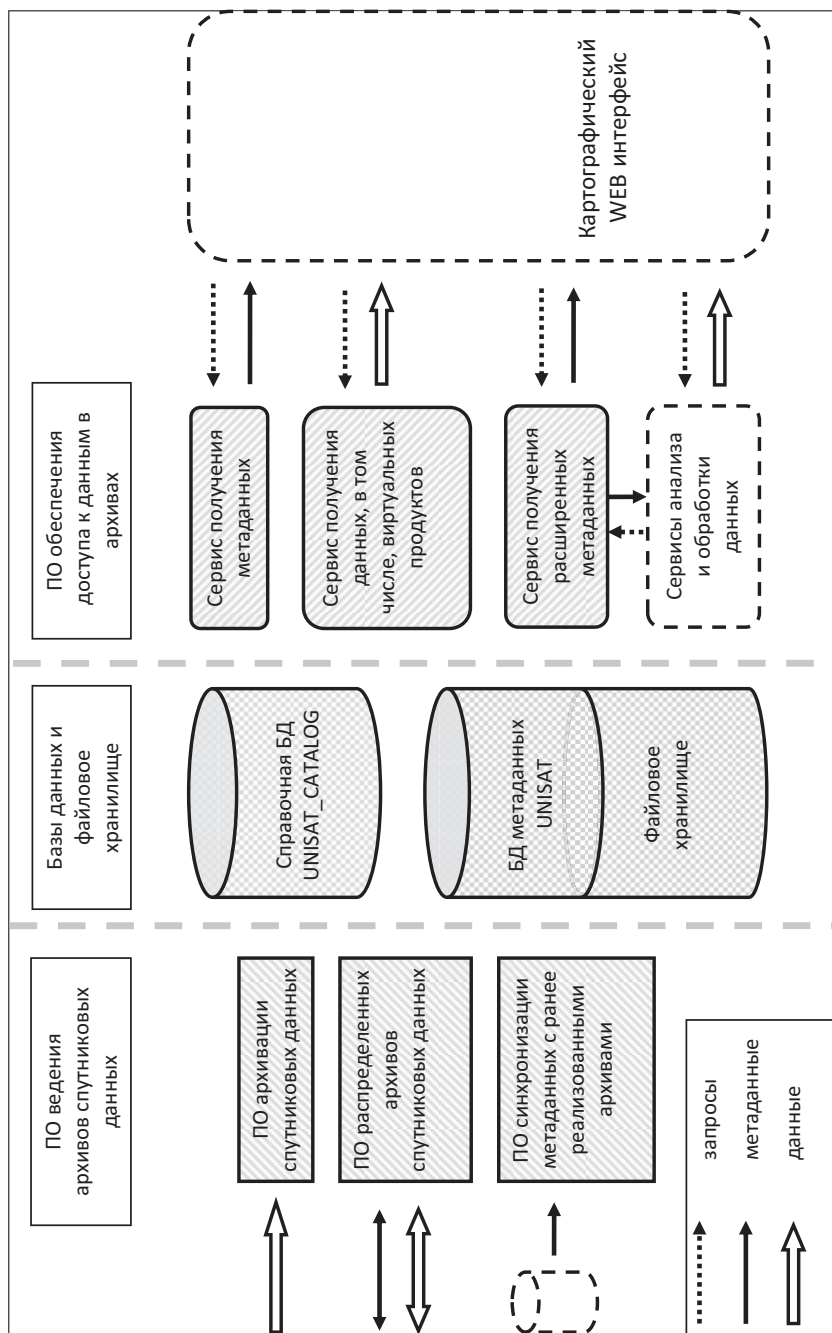


Рис. 5.2. Архитектура систем на основе технологии UNISAT. Пунктирными стрелками показаны запросы на получение данных или метаданных, сплошными стрелками – метаданные, а полыми стрелками – данные. Внешние компоненты, непосредственно не входящие в состав системы ведения архивов, показаны пунктирными фигурами

Сервисы для получения расширенных метаданных. Для реализации инструментов анализа и обработки данных ДЗЗ в интерфейсах информационных систем наряду со стандартными атрибутами (время, спутник, прибор, тип продукта и т.д.) необходима детальная информация о правилах построения информационного продукта и характеристиках исходных данных.

Реализация распределенных архивов спутниковых данных. Данные могут поступать в архивы из внешних центров данных и с локальных станций их приема. Для каждого центра может быть определена политика экспорта данных или метаданных в остальные центры распределенного архива. В каждом центре может быть реализован свой набор спутниковых данных, но при этом содержаться справочная БД, синхронизируемая с центральным узлом системы. Преимуществом представленной схемы реализации распределенных архивов спутниковых данных является высокая степень гибкости в определении того, какие типы метаданных и данных должны передаваться между удаленными узлами архивов, что практически недостижимо при использовании стандартных инструментов репликации баз данных.

Программные средства импорта метаданных из архивов спутниковых данных. Для обеспечения возможности погружения в UNISAT информации из действующих систем архивации спутниковых данных разработан программный инструментарий, позволяющий импортировать метаданные и синхронизировать их состояние в постоянном режиме. Инструментарий рассчитан на работу с широким классом спутниковых данных.

5.3. Возможности создания инструментов распределенной обработки данных ДЗЗ

Работы по созданию инструментов обработки данных ДЗЗ на распределенных вычислительных ресурсах ведутся достаточно давно, однако заметные успехи в данном направлении достигнуты лишь в последние годы. Связано это со сложностью задачи, необходимостью использования мощных вычислительных ресурсов и развитием технологий построения web-интерфейсов. В России разработки в этом направлении активно велись в ВЦ СО РАН (Шокин и др., 2012), ИАПУ ДВО РАН (Бабяк и др., 2014), ИКИ РАН (Балашов и др., 2010а). Однако указанные разработки в основном были нацелены на предоставление пользователям возможностей работы с распределенными вычислительными ресурсами для организации offline обработки данных.

В последние годы активизировались разработки, направленные на интеграцию систем ведения сверхбольших распределенных архивов данных и их online анализа. Такие системы ориентированы на широкий круг специалистов, использующих для работы с данными ДЗЗ доступные программные комплексы или собственные процедуры обработки. Наиболее известной системой такого типа является Google Earth Engine (Moore, Hansen, 2011; <https://earthengine.google.org>), пользователи которой могут запускать на кластере системы собственные процедуры обработки доступных в ней данных. Примером системы, предоставляющей доступ

к архивам данных и средствам их обработки, может служить и сервис NASA GIOVANNI (Acker, Leptoukh, 2007).

Развитие технологий построения web-интерфейсов обеспечило возможность создания систем, предоставляющих пользователям инструменты обработки спутниковых данных, ранее доступные лишь в настольных приложениях. Подобные инструменты могут быть интегрированы с архивами спутниковых данных, обеспечивая пользователям возможность оперирования огромными информационными массивами с их обработкой на распределенных вычислительных ресурсах (Кашницкий и др., 2015а). Структурная схема технологии представлена на *рис. 5.3*, а для ее реализации созданы следующие блоки:

Интерфейсы пользователя – обеспечивают возможность удаленного управления процедурами обработки данных (выбор, задание параметров, контроль выполнения и т.д.) и анализа результатов. Реализуется в виде картографических web-интерфейсов, созданных на основе технологии GEOSMIS. Выбор данных для обработки реализуется средствами поиска информации в архивах (Толпин и др., 2011а). Созданы интерфейсы настройки параметров процедур обработки данных;

Блок хранения заданий и результатов – состоит из базы данных заданий (БДЗ), файлового архива результатов, библиотеки доступа к ним и модулей интерфейса источника данных для сервиса отображения (Толпин и др., 2011а). В БДЗ хранятся задания на обработку с информацией о ходе и результатах их выполнения;

Блок работы с заданиями – функционально состоит из менеджера заданий с отдельным плагином по каждому типу обработки и программы контроля очереди и запуска заданий;

Блок подготовки данных для обработки – обеспечивает выбор данных из архивов в соответствии с установками пользователей и передачу их в процедуры обработки.

Реализованные в технологии блоки являются универсальными и рассчитаны на использование в различных СДМ. В соответствии с базовой структурой для различных процедур обработки данных однотипно организуется цикл обработки, представленный на *рис. 5.4*. Картографический web-интерфейс позволяет пользователю устанавливать параметры производимых операций (заданий). Так как выполнение заданий может занимать значительное время, интерфейс поддерживает возможность контроля хода обработки. После получения от пользователя задания на обработку оно помещается в базу данных, а пользователю возвращается информация о постановке задания в очередь. Web-интерфейс периодически опрашивает базу данных через менеджер заданий и информирует пользователя о статусе его выполнения.

Работу с очередью осуществляет программа контроля и запуска заданий. Очередь формируется из заданий по времени их поступления при одновременной обработке некоторого предельного их числа, задаваемого исходя из технических возможностей и загруженности вычислительного ресурса.

Подготовка данных проводится параллельно для всех указанных пользователем источников данных задания. Со стороны менеджера заданий, работающего на сервере обработки, этот этап представляет собой обращение к серверу-диспетчеру исходных данных и загрузки через него данных. Процесс подготовки исходных данных связан с существующей архитектурой систем архивации и доступа

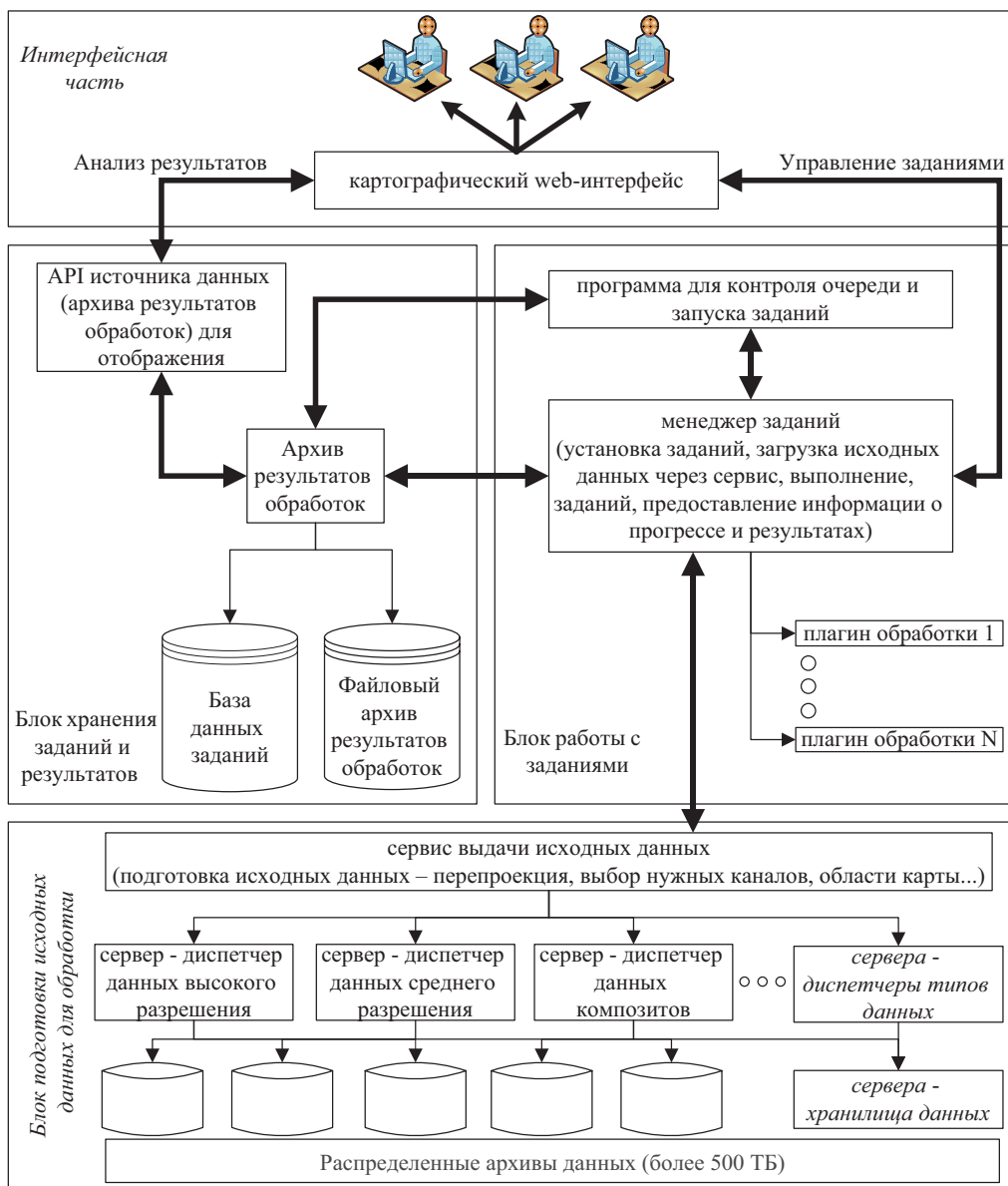


Рис. 5.3. Принципиальная схема построения технологии

к данным (Балашов и др., 2008; Бурцев и др., 2012). Для каждого типа данных выделен сервер-диспетчер, задача которого состоит в нахождении серверов, хранящих необходимые данные и перенаправление на него запроса. Непосредственно на сервере-хранилище над исходными данными проводятся все необходимые операции: преобразование проекций изображений, получение запрашиваемых для обработ-

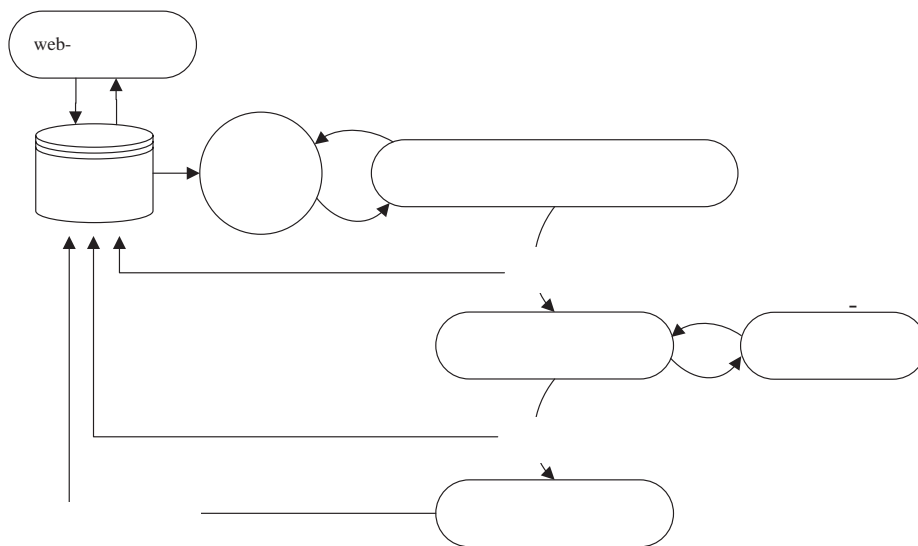


Рис. 5.4. Жизненный цикл запроса на обработку данных

ки спектральных каналов, вырезание данных по требуемой географической области и т.д. Независимо от типа исходных данных, местоположения и принципа их хранения, выходной файл сервиса стандартизован, что позволяет однообразно использовать данные в различных обработках.

После получения исходных данных и занесения информации в базу заданий на сервере инициализируется обработка. Общие функции вынесены в менеджер заданий, а специфические для конкретной обработки функции помещены в соответствующий плагин. Такая схема позволяет расширять возможности системы новыми типами обработки данных.

После завершения задания файлы результатов обработок могут передаваться на специально выделенные сервера или храниться на серверах обработки. Информация о местонахождении результатов отображается в базе данных заданий и используется для доступа к результатам через API источника данных к сервису (Толпин и др., 2011а).

Сервера, обеспечивающие работу различных блоков и функций технологии (обработка, диспетчеризация, хранение и т.д.), могут быть территориально распределены. Проведение обработки данных может масштабироваться на любое количество серверов. В таком случае контроль и распределение заданий по серверам обработки осуществляются программой контроля очереди и запуска заданий.

Примеры инструментов анализа данных на основе созданной технологии. На основе технологии распределенной обработки данных в различных информационных сервисах семейства «Созвездие-Вега» (<http://sozvezdie-vega.ru/>) разработаны инструменты, позволяющие с использованием картографических web-интерфейсов проводить операции с данными, например:

- *Инструмент вычислений* — позволяет проводить логические операции и различные математические преобразования над данными. Значения в отдельных

каналах спутниковых изображений могут быть преобразованы по формулам, задаваемым пользователем в интерфейсе. Результатом обработки являются новые изображения, созданные на основе растровых слоев с помощью арифметических и логических операций, применения математических функций. С помощью инструмента возможен расчет различных вегетационных индексов.

- *Инструмент классификации* позволяет проводить обработку данных ДЗЗ с использованием методов обучаемой классификации и кластеризации, реализованных в виде модулей GRASS (Neteler et al., 2012; <http://grass.osgeo.org/>). Задание обучающей выборки для классификации осуществляется экспертом или на основе автоматической процедуры с использованием имеющихся в системе карт.
- *Инструмент для создания различных спектральных индексов*. В настоящее время разработано большое число спектральных индексов, ориентированных на анализ различных процессов, в том числе определяющих состояние растительности. Реализованный на основе обсуждаемой технологии инструмент позволяет создавать различные спектральные индексы, вести их базу данных и осуществлять применение к различным спутниковым данным, имеющим необходимые спектральные каналы.

Более подробно возможности данных инструментов описаны в работах (Кашницкий и др., 2015а, 2016; Саворский и др., 2016).

5.4. Основные возможности сервиса ВЕГА-SCIENCE для анализа состояния и динамики растительного покрова

Разработанные к настоящему времени технологии работы с данными ДЗЗ позволили создать уникальный сервис ВЕГА-SCIENCE (<http://sci-vega.ru/>), используемый в различных научных проектах для решения задач мониторинга растительного покрова. Созданный сервис позволяет решать широкий класс задач и дает возможность различным научным проектам избежать расходов на создание дорогостоящей инфраструктуры сбора, обработки и анализа спутниковых данных. Спутниковый сервис ВЕГА-SCIENCE позволяет включать в него различные продукты и информационные ресурсы, создаваемые в рамках различных проектов, что обеспечивает удобный механизм широкого представления и использования полученных результатов.

Текущая зона географического охвата сервиса представлена на *рис. 5.5*. Основной задачей ВЕГА-SCIENCE является обеспечение удобного доступа к данным ДЗЗ и предоставление различных инструментов анализа спутниковых данных и результатов их обработки. Пользователям сервиса ВЕГА-SCIENCE доступны ежедневно пополняемые архивы спутниковых данных различных спутниковых систем, в том числе данные спутников Terra, Aqua, Landsat, Meteor M, Sentinel 1, Sentinel 2 и др.

Система ВЕГА-SCIENCE позволяет оперировать различными продуктами, полученными на основе спутниковых данных, например, очищенными от влияния

шумов и облачности временными композитными продуктами, создаваемыми на основе методов, описанных в главе 3.

Примеры используемых в системе композитных изображений, получаемых на основе данных Landsat ETM+/OLI (30 м), Proba-V (115 м) и MODIS (250 м), представлены на *рис. 5.6*.

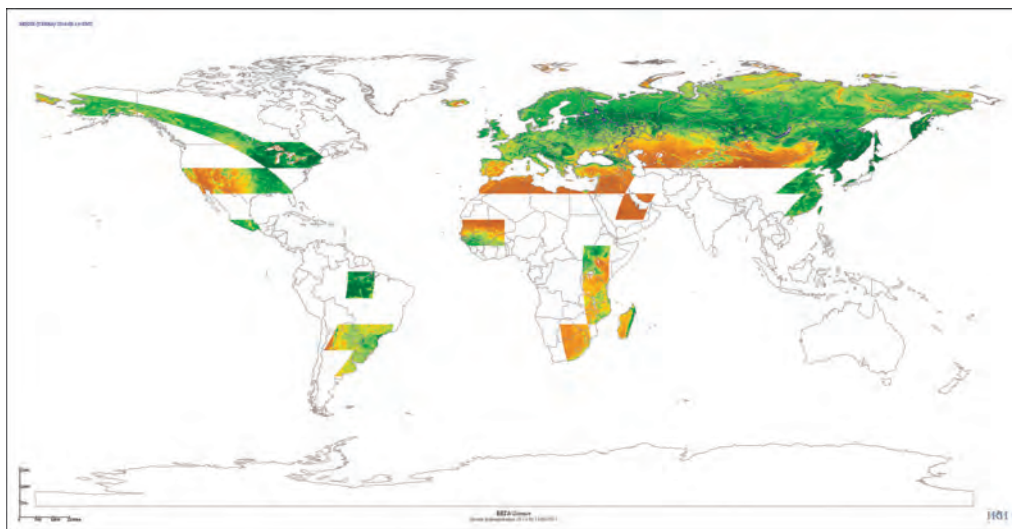
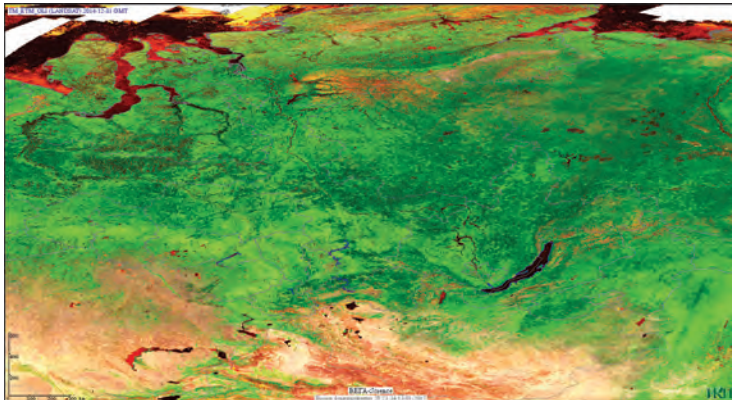


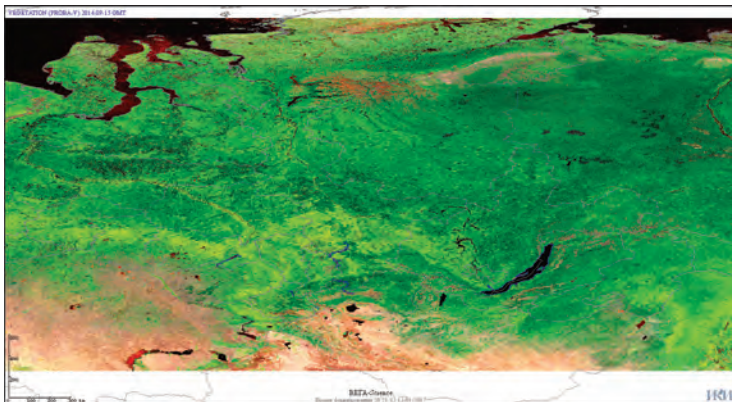
Рис 5.5. Текущая зона охвата спутникового сервиса BEGA-SCIENCE

Для анализа данных в BEGA-SCIENCE реализованы различные пользовательские интерфейсы: картографический интерфейс, интерфейсы анализа рядов данных, управления заданными пользователями объектами, получения отчетных форм. Отметим, что предоставляемые BEGA-SCIENCE инструменты позволяют проводить анализ на различных уровнях интеграции данных. Они позволяют исследовать состояние и динамику растительного покрова в отдельных пикселях (точках), в заданных пользователем участках (объектах), на уровне административных районов или субъектов РФ. Сервис реализует автоматизированные процедуры обработки данных на всех этих уровнях, позволяя получать однородную информацию и предоставляя следующие функциональные возможности:

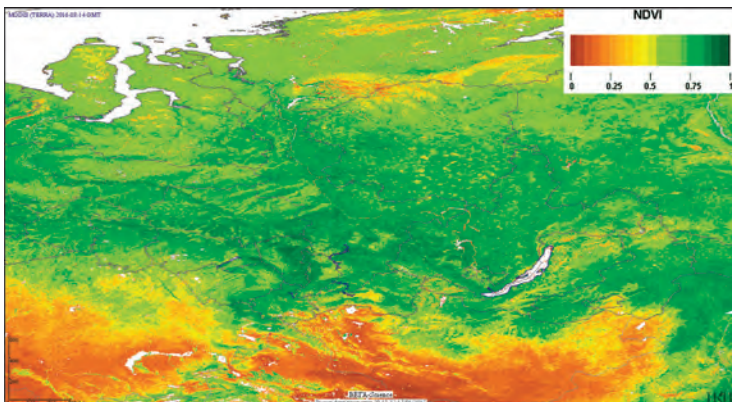
- комплексный анализ спутниковых данных различного пространственного разрешения и результатов их обработки, картографических и атрибутивных тематических данных;
- ведение пользовательской базы данных контуров и характеристик различных объектов, мониторинг их состояния;
- анализ интегральных характеристик состояния растительности по областям, районам или заданным пользователем объектам;
- анализ динамики вегетационного индекса;
- формирование аналитических форм состояния растительности;
- импорт/экспорт данных в различные информационные системы.



а)



б)



в)

Рис. 5.6. Примеры композитных изображений в спутниковом сервисе BEGA-SCIENCE: а) композит Landsat (ежегодный); б) композит Proba-V (сезонный) (псевдоцвета: R: красный канал, G: ближний ИК канал, B: средний ИК канал); в) композит NDVI на основе данных MODIS (еженедельный)

В системе BEGA-SCIENCE имеется набор интерфейсов, позволяющих проводить анализ временных, пространственных и спектральных рядов данных, получаемых на различных уровнях интеграции. Пример такого интерфейса приведен на *рис. 5.7*.

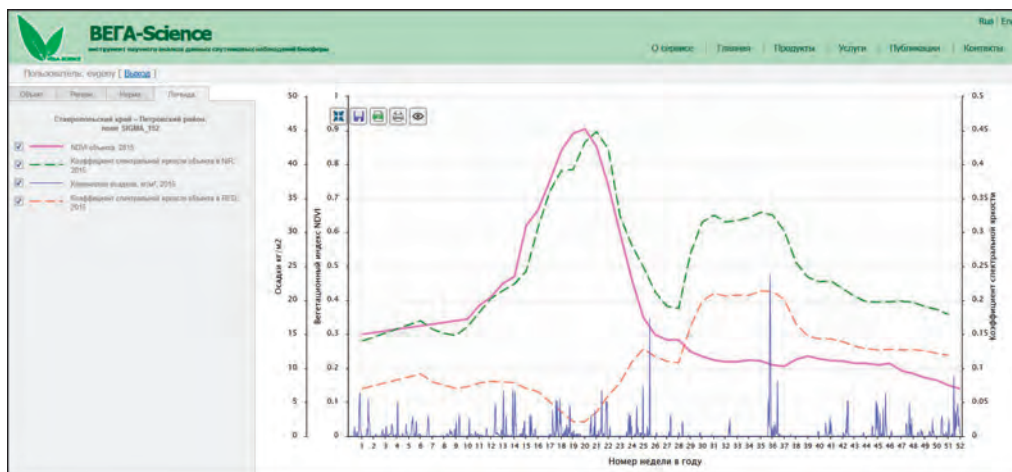


Рис. 5.7. Пример интерфейса анализа временных рядов вегетационного индекса

Картографический web-интерфейс, входящий в состав сервиса, обеспечивает характерные для геоинформационных систем функции поиска, отображения и анализа данных. Интерфейс позволяет визуализировать спутниковые данные, а также получаемые на их основе продукты, в том числе виртуальные. Одной из особенностей интерфейса являются реализованные в нем функции обработки и анализа данных ДЗЗ, позволяющие, например, осуществлять:

- улучшение и цветовой синтез изображений;
- арифметические операции с изображениями;
- расчет вегетационных индексов;
- расчет статистик изображений для пользовательских объектов;
- классификацию изображений.

В системе создан блок VI-аналитики, позволяющий проводить динамический анализ ежегодно обновляемой картографической информации о растительном покрове (Барталев и др., 2011а). Для работы с такой информацией реализована схема формирования OLAP-куба на основе растровых карт. Для этого карты фрагментируются на участки, на которых оцениваются характеристики типов растительности (*рис. 5.8*) с формированием OLAP-куба. Для решения задач анализа растительного покрова в разрезе регионов страны интеграция информации при формировании OLAP-куба производится в границах субъектов РФ.

Детальному описанию возможностей сервиса посвящен целый ряд статей (Толпин и др., 2011а, б; Лупян и др., 2011б; Саворский и др., 2016; Кашницкий и др., 2015а, 2016; Кобец и др., 2015а).

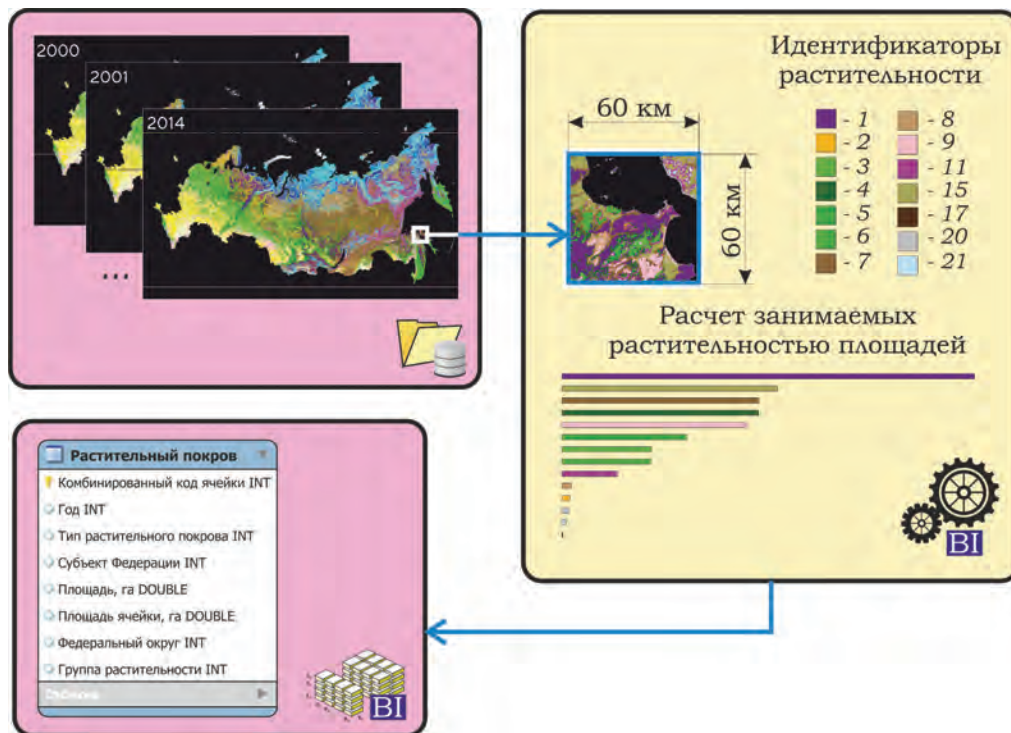


Рис. 5.8. Схема формирования OLAP-куба по данным карт растительного покрова, полученных на основе спутниковых данных

5.5. Использование спутникового сервиса BEGA-SCIENCE для построения и анализа карт растительного покрова

В настоящем разделе мы приведем несколько примеров использования сервиса BEGA-SCIENCE для решения задач, связанных с картографированием растительного покрова и анализа получаемых при этом результатов. Следует отметить, что имеющиеся в системе возможности позволяют реализовать достаточно сложные комплексные процедуры обработки и анализа данных ДЗЗ.

Проведение локального картографирования растительного покрова с использованием данных высокого пространственного разрешения. Как отмечалось в предыдущем разделе, в системе BEGA-SCIENCE доступны значительные объемы спутниковых данных ДЗЗ достаточно высокого пространственного разрешения, в том числе получаемые со спутников Landsat и Sentinel. В системе также имеются различные, ежегодно обновляемые карты растительного покрова, построенные на основе данных среднего пространственного разрешения (100–300 м) и реализованы инструменты, позволяющие проводить классификацию различных наборов спут-

никовых данных с использованием обучающих выборок. Эти компоненты позволили реализовать в системе процедуры локального картографирования растительного покрова с формированием на основе карт среднего пространственного разрешения обучающих выборок и их последующим использованием для классификации данных высокого пространственного разрешения. Реализованная для этого в системе специальная процедура позволяет автоматически создавать обучающие выборки на основе различных карт, а именно:

- провести анализ выбранной карты с выбором «доверенных» пикселей для обучения («доверенным» считается каждый пиксель, окруженный пикселями того же класса);
- провести равномерное прореживание выбранных «достоверных» пикселей для сокращения объема обучающей выборки;
- предоставить пользователю возможность интерактивной коррекции сформированной выборки;
- сохранить обучающую выборку в базу данных и предоставить возможность ее использования в процедуре классификации.

Возможности достаточно простого построения обучающих выборок и выбора данных для классификации позволяют эффективно проводить локальную классификацию (картографирование) растительного покрова (см. пример на *рис. 5.9*). Для классификации могут быть выбраны каналы одномоментных изображений или их временные ряды.

Реализация специализированных процедур картографирования гарей. Одной из особенностей системы BEGA-SCIENCE является возможность создания достаточно сложных процедур обработки данных. При этом в системе могут создаваться комплексные процедуры, которые позволяют проводить быстрый и удобный выбор данных ДЗЗ, проведение их обработки, сохранение результатов и их дальнейший анализ. При этом для выполнения всех процедур максимально используется стандартный функционал сервиса BEGA-SCIENCE. Это позволяет достаточно быстро реализовывать различные схемы массовой обработки данных и обеспечивать максимально возможную автоматизацию различных ее этапов. Такие возможности, в частности, могут использоваться для создания специализированных процедур обработки данных в интересах конкретных проектов.

Возможности создания и особенности работы таких процедур рассмотрим на примере технологии массового картографирования лесных гарей с использованием спутниковых данных высокого пространственного разрешения (Кашницкий и др., 2015б).

Необходимость решения данной задачи связана в первую очередь с тем, что в системах дистанционного мониторинга природных пожаров для их оперативного детектирования обычно используются данные низкого пространственного разрешения (~ 1 км). В этой связи после завершения пожаров целесообразно уточнение пройденных огнем площадей с использованием данных ДЗЗ более высокого пространственного разрешения.

Известны различные процедуры такого уточнения, описанные, в частности, в работах (Барталев и др., 2009, 2012а, б, 2014; Ефремов и др., 2010). Такие процедуры обычно основываются на использовании инструментов, позволяющих прово-

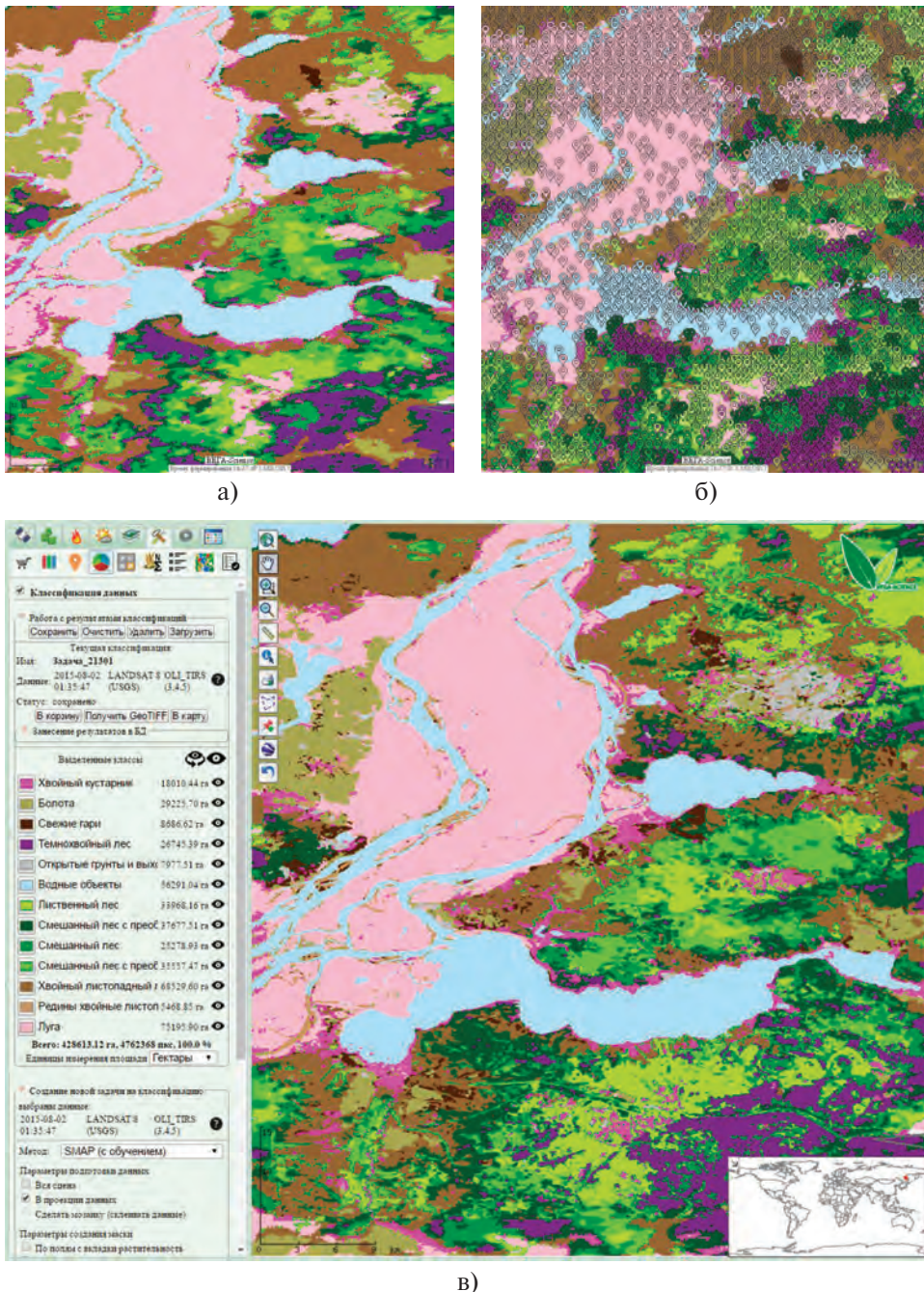


Рис. 5.9. Пример построения локальной карты растительного покрова по данным Landsat с обучением на основе карты растительного покрова по данным MODIS:

- а) участок карты, построенной по данным MODIS;
- б) результат автоматического построения обучающей выборки;
- в) результат классификации с обучением по данным Landsat

дить интерактивное оконтуривание гарей. Для проведения массовой оценки пройденных огнем площадей на больших территориях необходимо построение максимально формализованных автоматизированных процедур обработки данных ДЗЗ. Наличие таких процедур позволяет, с одной стороны, получать более объективную, т.е. не зависящую от квалификации оператора, информацию, а с другой стороны, упростить процедуру и повысить скорость обработки данных.

Реализованная в системе BEGA-SCIENCE процедура предполагает проведение неконтролируемой классификации данных ДЗЗ, заменяя визуальное оконтуривание гари экспертным анализом результатов кластеризации и сводя, таким образом, задачу оператора к выбору наилучшего решения из ограниченного числа вариантов. В силу достаточно высокого уровня формализации это позволяет получать более устойчивые решения при интерактивном анализе данных разными специалистами.

Основной задачей процедуры является уточнение информации о зонах горения, получаемых по данным спутниковых наблюдений низкого пространственного разрешения в каналах 3,7 мкм и 11 мкм приборами типа MODIS (спутники AQUA, TERRA) и VIIRS (спутник NPP). Для оценки пройденной огнем площади на основе этих данных разработаны специальные процедуры формирования контуров пожаров (Флитман и др., 2011). Однако, в силу пространственного разрешения используемых данных ДЗЗ (500 м–1 км), получаемая на их основе оценка пройденной огнем площади может сопровождаться значительными погрешностями (Барталев и др., 2014, 2015б). Основной задачей процедуры уточнения площади пожара с использованием данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения является выделение фактически пройденной огнем территории. При этом для получения оценки пройденной огнем площади на территории РФ в течение пожароопасного сезона необходимо провести картографирование огромного, в отдельные годы превышающего 10000, числа пожаров.

Для решения данной задачи с использованием спутникового сервиса BEGA-SCIENCE разработана процедура, включающая следующие основные этапы:

- выбор пожара для проведения уточнения его границ и площади;
- поиск и выбор данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения;
- интерактивное оконтуривание пройденной огнем площади с использованием процедуры классификации;
- проверка корректности оконтуривания гари.

Общая схема процедуры представлена на *рис. 5.10*. Элементы реализованной схемы уточнения площади пожаров детально рассмотрены в ряде научных публикаций (Барталев и др., 2012а, 2014; Кашницкий и др., 2015б).

В качестве первого шага процедура предполагает выбор пожара, выявленного по результатам его детектирования на этапе горения (Флитман и др., 2011) и требующего уточнения площади. Для проведения уточнения оператор подбирает спутниковые данные ДЗЗ высокого пространственного разрешения, полученные после даты окончания пожара и свободные от маскирующего влияния облачности. Наиболее эффективно для решения этой задачи в настоящее время используются данные систем ДЗЗ Landsat-OLI-TIRS и Sentinel 2. В ряде случаев применение находят и данные КМСС (Метеор М № 2).

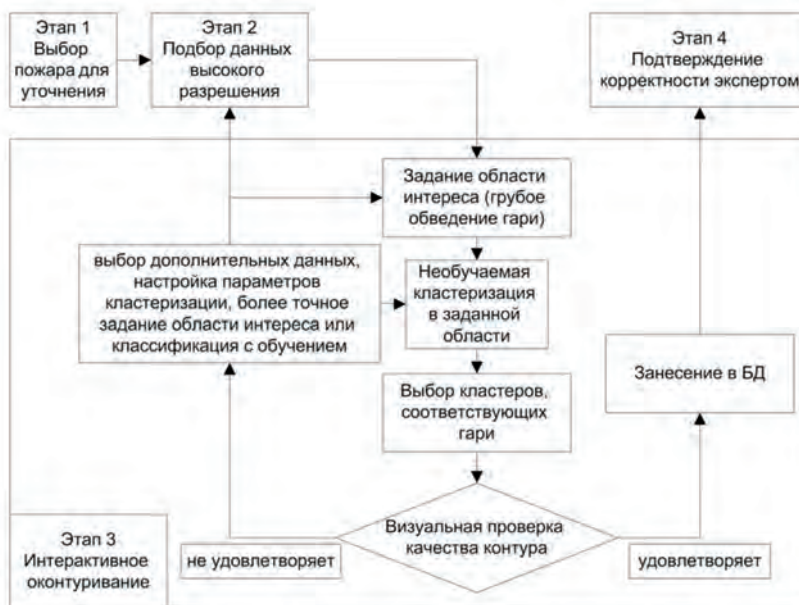


Рис. 5.10. Схема процедуры уточнения пройденной пожарами площади на основе данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения

Преимущества использования данных Landsat и Sentinel 2 обусловлены их качеством, точной географической привязкой и частотой наблюдения, позволяющей в большинстве случаев получать спутниковые изображения гари в течение короткого времени после завершения пожара, а также наличием спектральных каналов, обеспечивающих возможность выявления пройденных огнем территорий.

Для максимальной автоматизации выполнения процедуры в систему ВЕГА-SCIENCE добавлены функции, позволяющие осуществлять выбор необходимых данных, сохранение и проверку результатов. Создана специализированная БД для хранения информации о пройденных огнем площадях и блок ее автоматического пополнения с аннотированием контуров гарей информацией о растительном покрове.

Наиболее сложным этапом с точки зрения формализации в рассматриваемой процедуре является этап интерактивного оконтуривания, предполагающий выполнение следующих операций:

- Предварительное интерактивное оконтуривание гари с целью ограничения области проведения классификации. При этом требуется полное включение гари в область классификации при одновременной минимизации присутствия в ней неповрежденных огнем участков.
- Неконтролируемая классификация изображения в заданной области с выделением ограниченного числа кластеров.
- Отбор соответствующих гари кластеров с их последующим объединением в контур гари.
- Сохранение контура гари в специализированной БД.

Рис. 5.11 иллюстрирует различные этапы процедуры картографирования контуров гари. Описанная процедура позволяет ежегодно проводить картографирование нескольких тысяч гарей на всей территории России. В настоящее время она используется не только в системе BEGA-SCIENCE, но и в других системах дистанционного мониторинга лесов и лесных пожаров (Лупян и др., 2015в, 2016).

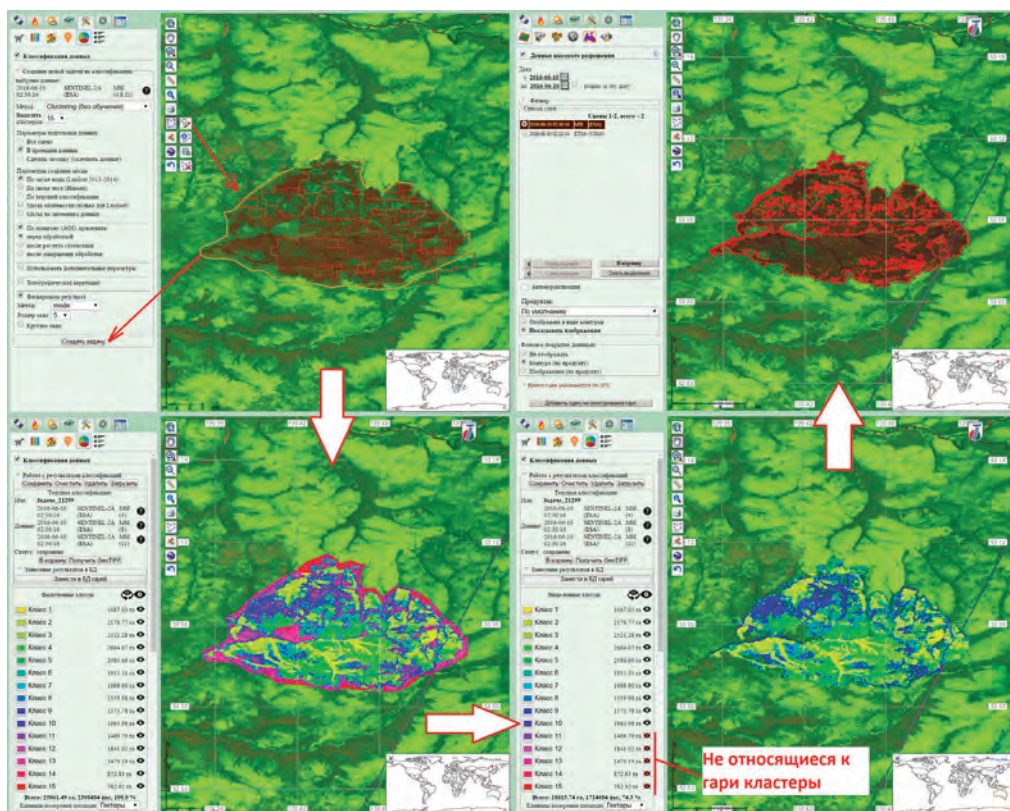
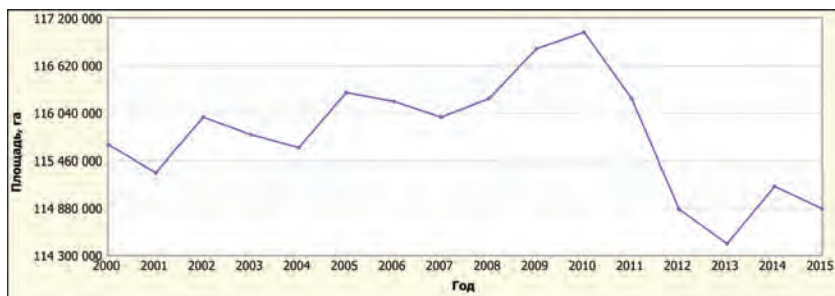


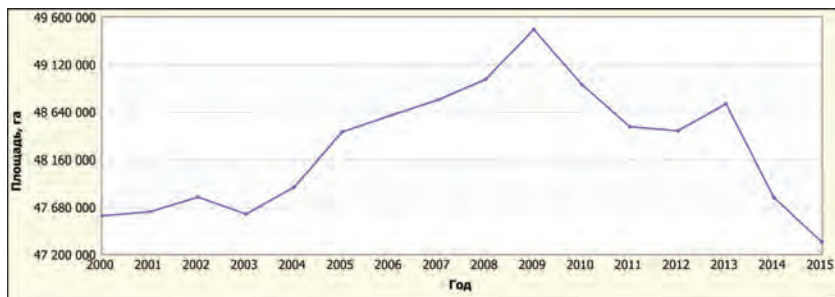
Рис. 5.11. Основные этапы выделения контура гари методом неконтролируемой классификации изображений

Анализ изменений лесного покрова на уровне регионов. Как уже отмечалось, в системе BEGA-SCIENCE имеется набор сформированных на основе спутниковых данных ДЗЗ карт растительного покрова за различные годы, что позволяет изучать его динамику. Для проведения такого анализа в системе может быть использован блок VI-аналитики, позволяющий, в частности, работать с рядами данных о площади различных типов растительного покрова в регионах России и в стране в целом. На рис. 5.12 приведены примеры анализа изменений лесов Красноярского края с помощью инструментов BEGA-SCIENCE и карт растительного покрова (глава 4), ежегодно получаемых на основе данных MODIS. Так, рис. 5.12а демонстрирует смену тенденции незначительного роста площади лесов региона, наблюдавшейся

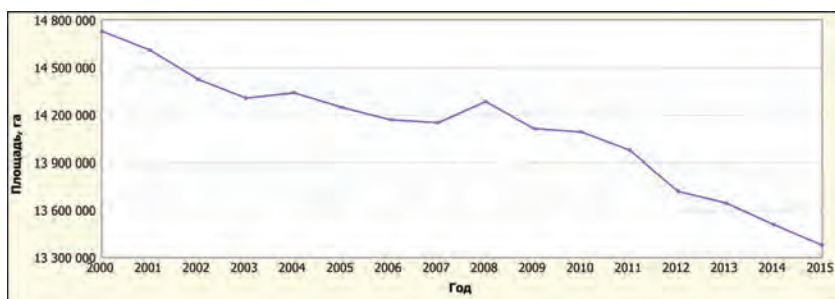
до 2010 года, достаточно резким ее спадом в 2011–2015 годах. При этом в крае наблюдается практически постоянное сокращение после 2009 года площади лиственных лесов (рис. 5.12б). Более детальный анализ показывает, что основной рост площади лесов произошел во многом за счет труднодоступных северных территорий, в то время как динамика темнохвойных лесов (рис. 5.12в) наглядно демонстрирует тенденцию практически постоянного сокращения их площади в 2000–2015 годах. За этот период площадь темнохвойных лесов в крае сократилась почти на 9%, что, видимо, во многом вызвано вырубками и пожарами.



а) динамика покрытой лесом площади



б) динамика площади хвойных листопадных (лиственничных) лесов



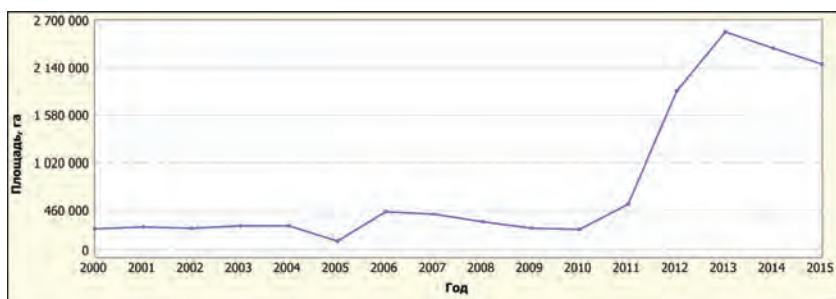
в) динамики площади темнохвойных лесов

Рис. 5.12. Динамика площади лесов Красноярского края, полученная на основе анализа карт, построенных с использованием данных MODIS

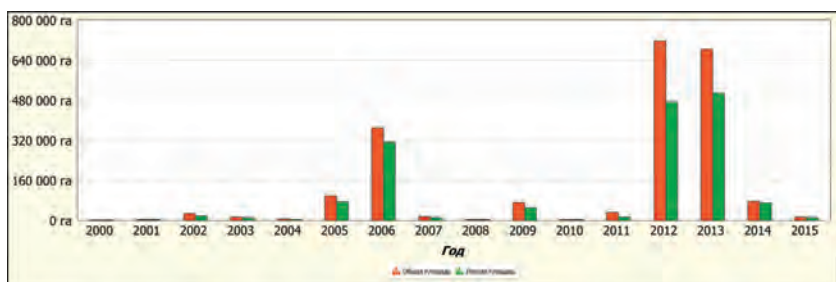
В частности, резкое сокращение площади лесов в период 2011–2013 годов следует, видимо, в значительной мере отнести к последствиям природных пожа-

ров, информация о которых, свидетельствующая об увеличении в этот же период площади необлесенных гарей в регионе, приведена на *рис. 5.13а*. Имеющиеся в системе данные и инструменты позволяют анализировать не только динамику общей площади природных пожаров в крае, но и получать информацию о горении лесов на различных по уровню противопожарной охраны территориях. Например, приведенные на *рис. 5.13б* и *5.13в* данные о горении лесов на неохраняемых территориях также наглядно демонстрируют резкий рост площади пожаров в 2012–2013 годах, требующий учета при дальнейшей организации охраны лесов региона.

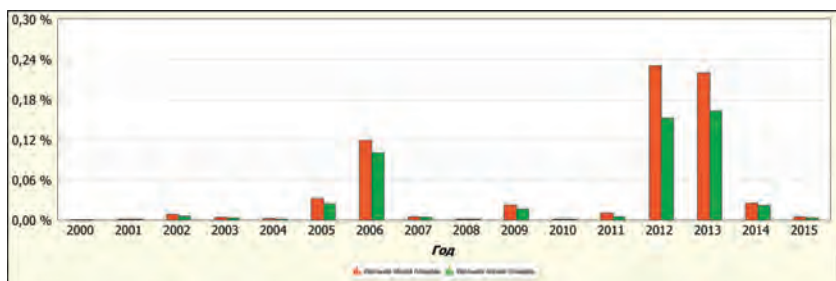
Приведенные примеры убедительно свидетельствуют о широких возможностях системы BEGA-SCIENCE для картографирования растительного покрова по данным ДЗЗ и анализа получаемой информации о его состоянии и динамике.



а) площади необлесенных гарей



б) пройденные огнем площади в зоне космического мониторинга 2-го уровня



в) процент пройденной огнем площади в зоне космического мониторинга 2-го уровня от общей площади природных пожаров в регионе

Рис. 5.13. Информация о площадях лесных пожаров в Красноярском крае на основе результатов детектирования очагов горения и повреждений лесов по данным ДЗЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная коллективом авторов и представленная в настоящей монографии методология автоматизированного картографирования растительного покрова, а также уникальный опыт создания на ее основе с использованием данных MODIS серии тематических карт, на наш взгляд, не имеют аналогов в стране. Предложенные методы и созданные на их основе карты растительного покрова активно используются для решения различных научных и прикладных задач, в том числе в составе действующих информационных систем спутникового мониторинга окружающей среды национального и регионального уровней, например, таких, как:

- Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) (Барталев и др., 2010; Лупян и др., 2015в).
- Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности ВЕГА (Лупян и др., 2011б, 2014б; Барталев и др., 2012б).
- Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (Лупян и др., 2015б).
- Информационная система комплексного дистанционного мониторинга лесов «Вега-Приморье» (Лупян и др., 2016).

Вместе с тем все более расширяющееся практическое использование карт растительного покрова в различных областях экономической деятельности (лесное хозяйство и лесная промышленность, сельское хозяйство, охотничье хозяйство) и научно-исследовательских проектах позволяет уточнять требования пользователей к их тематической нагрузке, выявлять и систематизировать имеющиеся неточности картографирования, планировать пути дальнейшего совершенствования методологии. Стимулирующее влияние на развитие методологии спутникового картографирования растительного покрова оказывает и запуск в эксплуатацию новых, отвечающих необходимым техническим требованиям и обладающих улучшенными характеристиками спутниковых систем ДЗЗ. При этом, на наш взгляд, можно выделить следующие приоритетные направления совершенствования методологии спутникового картографирования растительного покрова:

- повышение точности классификации и оценки характеристик растительного покрова;

- повышение пространственного разрешения карт растительного покрова;
- расширение состава картографируемых тематических классов и характеристик растительного покрова.

При этом необходимо отметить, что оценка достигнутой к настоящему времени тематической точности (валидация) существующих спутниковых карт растительного покрова представляет собой самостоятельную задачу исследований, не решенную к настоящему времени в полной мере. Основным фактором, лимитирующим возможности валидации созданных карт, является чрезвычайная трудоемкость формирования наборов опорных данных о растительном покрове, полностью отвечающих предъявляемым к ним требованиям репрезентативности и достоверности. В частности, удовлетворение требованию достоверности опорных данных часто может быть достигнуто лишь при проведении специализированных наземных обследований. В связи с практической сложностью формирования полноценных наборов опорных данных для валидации карт часто приходится прибегать к косвенным оценкам их точности на основе сравнения с доступной информацией, в качестве которой могут выступать, например, данные официальной статистики, материалы инвентаризации лесов, существующие тематические карты или результаты визуальной интерпретации спутниковых изображений. Будучи, безусловно, полезным для выявления макроскопических ошибок спутникового картографирования растительного покрова, использование такого рода данных тем не менее дает лишь весьма приблизительное представление о реальной точности создаваемых карт. В этой связи организация и проведение полномасштабной валидации созданных и создаваемых карт растительного покрова приобретает особую актуальность, находясь в ряду приоритетных задач перспективных исследований.

Созданные карты находят применение для мониторинга и прогноза развития лесных пожаров, оценки степени повреждения лесов огнем и причиненного им ущерба, мониторинга санитарного состояния лесов, оценки среды обитания и учета численности охотничьих ресурсов, оценки биологического разнообразия в лесах и решения целого ряда других задач. Вместе с тем следует отметить, что относительно невысокий уровень пространственного разрешения созданных к настоящему времени карт существенно ограничивает их эффективное использование в ряде регионов страны и решение на их основе ряда прикладных задач. В частности, уровень пространственного разрешения созданных карт растительного покрова не достаточен для их эффективного использования в малолесных регионах страны с преобладанием колочных или фрагментированных лесов. Кроме того, пространственное разрешение карт накладывает ограничения и на возможности их использования для оценки процессов лесопользования и лесовозобновления на вырубках с достаточной полнотой и достоверностью.

Исходя из вышесказанного очевидно, что существующие ограничения диктуют необходимость создания карт растительного покрова России более высокого пространственного разрешения. В то же время, несмотря на кажущуюся очевидность путей решения данной проблемы за счет использования спутниковых данных более высокого пространственного разрешения, необходимо отметить, что, будучи, безусловно, необходимым, это условие не является единственным и достаточным. В частности, выполненные ранее исследования (Барталев, Лупян, 2013) убедитель-

но показывают, что автоматизированное распознавание категорий лесных и нелесных земель, лесов различной породной структуры, сельскохозяйственных земель должно опираться на использование данных дистанционных наблюдений достаточно высокого временного разрешения, что накладывает дополнительные ограничения на возможности выбора спутниковых систем ДЗЗ для решения этой задачи. Таким образом, с учетом необходимости удовлетворения двум противоречащим условиям (в силу характерной для современной группировки спутников дистанционного зондирования обратной зависимости между величинами пространственного и временного разрешения) обоснованный выбор источника спутниковых данных ДЗЗ, способных обеспечить повышение детальности автоматизированного картографирования растительного покрова в масштабах страны, до недавнего времени представлялся достаточно проблематичным.

Ввод в эксплуатацию в 2014 году новой системы ДЗЗ Proba-V, отличающейся уникальным сочетанием пространственного (115 м) и временного разрешения (от 6 до 18 наблюдений в месяц для территории России) получаемых данных, открыл возможность дальнейшего существенного развития методов спутникового картографирования растительного покрова. Появление данных столь частых спутниковых измерений спектрально-отражательных характеристик земной поверхности с достаточно высоким уровнем пространственного разрешения обеспечивает возможность разработки методов автоматизированного распознавания типов растительного покрова, учитывающих различия их сезонной динамики, при недостижимом ранее сочетании уровней пространственной и тематической детальности. Это позволяет рассматривать в качестве одной из приоритетных задач разработку методов картографирования растительного покрова в масштабах страны с пространственным разрешением 115 м, обеспечивая, таким образом, более чем двукратное повышение уровня детальности формируемых карт в сравнении с их ближайшими аналогами. При этом предполагается максимально полное использование и дальнейшее развитие разработанных коллективом авторов методических, алгоритмических и программных решений. Это позволит не только обеспечить тематическую преемственность новых картографических продуктов, но и осуществить их разработку в сжатые сроки.

В качестве более отдаленной перспективы можно рассматривать дальнейшее повышение пространственного разрешения спутниковых карт растительного покрова России до величины 10–30 м за счет использования данных, получаемых системами Landsat-OLI и Sentinel-2. Необходимую основу для проведения работ в этом направлении создает сформированный в составе Центра коллективного пользования ИКИ РАН и непрерывно обновляемый архив спутниковых данных ДЗЗ на всю территорию страны (Лупян и др., 2015б). Вместе с тем картографирование растительного покрова на национальном уровне со столь высоким пространственным разрешением сопряжено с необходимостью существенного развития технической инфраструктуры, а также поиска более эффективных технологических решений в области хранения и обработки сверхбольших объемов данных.

Разработка и эксплуатация системы спутникового картографирования растительного покрова на национальном уровне сопряжена с необходимостью решения ряда сложных научно-методических, технологических и организационных задач. В частности, система спутникового картографирования раститель-

ного покрова России должна обеспечивать выполнение таких базовых функций, как:

- создание и непрерывное обновление сверхбольших (объемы, измеряемые петабайтами) банков спутниковых данных;
- предварительная обработка спутниковых данных (пространственная привязка, радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция, фильтрация различного рода помех) для обеспечения необходимого уровня их качества;
- автоматическое распознавание объектов земной поверхности на основе специализированных алгоритмов, адаптивных к пространственно-временным изменениям физико-географических условий;
- оценка биофизических характеристик земной поверхности на основе данных дистанционных измерений;
- валидация результатов мониторинга, в том числе с привлечением региональных экспертов;
- создание интерфейсов удаленного доступа пользователей к банкам спутниковых данных и полученной на их основе картографической информации.

Масштабность задач спутникового картографирования растительного покрова, сопряженных с обработкой сверхбольших массивов спутниковых данных, обуславливает необходимость использования высокопроизводительных вычислительных комплексов. Опираясь на полученный к настоящему моменту опыт, важно отметить, что методы автоматизированного картографирования растительного покрова требуют использования производных продуктов спутниковых данных, прошедших достаточно глубокую предварительную обработку.

Таким образом, к настоящему времени создан значительный научно-технологический задел в области методов и технологий спутникового картографирования растительного покрова, не только не уступающий, но по ряду направлений и превосходящий существующий в мире уровень, накоплены многолетние архивы спутниковых данных ДЗЗ на всю территорию страны и ряд регионов мира. В своей совокупности вышеупомянутые предпосылки сформировали необходимую научно-технологическую основу для разворачивания масштабных работ по созданию перспективной системы глобального космического мониторинга растительного покрова (Барталев и др., 2011в).

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Сокращения на русском языке

БД	База данных
БДЗ	База данных заданий
БИК	Ближний Инфракрасный
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
ДФСО	Двухлучевая функция спектрального отражения
ИК	Инфракрасный
ИКИ	Институт космических исследований
ИО	Индикатриса отражения
КМСС	Комплекс многозональной спутниковой съемки
КСЯ	Коэффициент спектральной яркости
МГБП	Международная геосферно-биосферная программа
МСП	Многослойные перцептроны
НАСА	Национальное управление США по воздухоплаванию и исследованию космического пространства
РАН	Российская академия наук
СДМ	Система дистанционного мониторинга
УФ	ультрафиолетовый
ФАО	Продовольственная и сельскохозяйственная организация
ЦКП	Центр коллективного пользования
ЦМР	Цифровая модель рельефа

Сокращения на иностранных языках

6S	Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum Повторное моделирование спутникового сигнала в солнечном спектре
AMBRALS	Algorithm for Model Bidirectional Reflectance Anisotropies of the Land Surfaces Алгоритм моделирования анизотропии двунаправленного отражения земных покровов

AMMI	Accumulated Minimum Multi-year Index Индекс сезонного снижения фитомассы
AOI	Area of interest Область обработки
AOT	Aerosol Optical Thickness Оптическая толщина аэрозолей
API	Application programming interface Интерфейс программирования приложений
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer Усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar Усовершенствованный радар с синтезированной апертурой
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer Усовершенствованный космический радиометр термальной эмиссии и отражения
BFGS	Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno Метод оптимизации Бройдена, Флетчера, Голдфарба и Шанно
BHR	Bihemispherical Reflectance Альbedo для диффузного освещения
BI	Business intelligence Бизнес-анализ
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function Двулучевая функция распределения отражения
BRF	Bidirectional Reflectance Factor Коэффициент двунаправленного отражения
BS	Black soil Подзадача «черная почва»
CEMI	Crop Emergence Multi-year Index Индекс весеннего развития растительности
DGVM	Dynamic Global Vegetation Models Глобальные модели динамики растительного покрова
DHR	Directional-Hemispherical Reflectance Альbedo для мононаправленного освещения
DOY	Day of the year День года
DT	Decision tree Метод дерева решений
DVI	Difference Vegetation Index Разностный вегетационный индекс
EC	European Commission Европейская комиссия

EGO	Efficient Global Optimization Эффективная глобальная оптимизация
Envisat	Environmental Earth-Observing Satellite Спутник дистанционного зондирования окружающей среды
ESA	European Space Agency Европейское космическое агентство
ETM+	Enhanced Thematic Mapper + Усовершенствованный тематический картограф +
EVI	Enhanced Vegetation Index Улучшенный вегетационный индекс
FAO	Food and Agriculture Organization Продовольственная и сельскохозяйственная организация
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library Библиотека абстракции гео-пространственных данных
GIMMS	Global Inventory Monitoring and Modeling Systems Системы мониторинга и моделирования для глобальной инвентаризации
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System Система лазерной альтиметрии для исследования Земли
GLC2000	Global Land Cover 2000 Типы земного покрова в глобальном масштабе в 2000 году
GLC30	Global Land Cover 30 Типы земного покрова в глобальном масштабе с разрешением 30 м
GSV	Growing stock volume Запас стволовой древесины
HDRF	Hemispherical-directional Reflectance Factor Коэффициент полусферически-направленного отражения
HRG	High Resolution Geometric Инструмент высокого разрешения для изучения геометрической структуры земного покрова
HRV	High Resolution Visible Инструмент высокого разрешения видимого диапазона
HRVIR	High Resolution Visible and Infra-Red Инструмент высокого разрешения видимого и инфракрасного Диапазонов
ICESat	Ice, Cloud, and land Elevation Satellite Спутник для изучения льда, облачности и высоты рельефа
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme Международная геосферно-биосферная программа
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Национальный институт технологий сельского хозяйства
JECAM	Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring Совместный эксперимент по оценке и мониторингу посевов

KBC2	Knowledge-based cropland classification Метод распознавания посевов на основе априорной информации
LAGMA	Locally-Adaptive Global Mapping Algorithm Локально-адаптивный алгоритм глобального Картографирования
LAI	Leaf Area Index Индекс листовой поверхности
Landsat	Land Remote-Sensing Satellite Спутник дистанционного зондирования Земли
LCCS	Land Cover Classification System Система классификации типов земного покрова
LPJ	Lund-Potsdam-Jena Модель Лунд-Потсдам-Йена
LSAM	Large-Scale Arable Lands Mapping Метод распознавания пашни на больших территориях
LUT	Look-up Tables Опорные таблицы
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer Спектрометр среднего разрешения
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer Многоугловой спектрорадиометр
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Спектрорадиометр среднего разрешения
MSAVI	Modified SAVI Модифицированный SAVI
MSS	Multi-Spectral Scanner Многоспектральный сканер
NASA	National Aeronautics and Space Administration Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства
NBAR	Nadir BRDF-Adjusted Reflectance Коэффициент отражения в зенит, скорректированный с учетом BRDF
NDSI	Normalized Difference Snow Index Нормализованный разностный индекс снега
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index Нормализованный разностный вегетационный индекс
NELDA	Northern Eurasia Land Dynamics Analysis Анализ динамики земель Северной Евразии
NIR	Near Infrared Ближний инфракрасный
NN	Neural network Метод нейронных сетей

NNE	Neural networks ensemble Метод нейросетевых ансамблей
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration Национальное агентство по океану и атмосфере
NPP	1) National Polar-orbiting Partnership Национальное сотрудничество в области космических аппаратов на полярных орбитах 2) Net Primary Productivity Чистая первичная продукция
OLAP	Online analytical processing Аналитическая обработка в реальном времени
OLI	Operational Land Imager Прибор для мониторинга земной поверхности
PAL	Pathfinder AVHRR Land Набор данных «Следопыт» для изучения земного покрова по данным AVHRR
PROBA-V	Project for On-Board Autonomy – Vegetation Проект бортовой автономности для прибора Vegetation
PVI	Perpendicular Vegetation Index Перпендикулярный вегетационный индекс
RA	Relative Azimuth относительный азимутальный угол между направлениями на сенсор и на Солнце;
RADI	Institute of Remote Sensing and Digital Earth Институт дистанционного зондирования и цифровой Земли
RCP	Representative Concentration Pathways Репрезентативные траектории концентрации
RPV	Rahman-Pinty-Verstraete модель Рамана-Пинти-Верстрата
RVI	Ratio Vegetation Index Дробный вегетационный индекс
S	Soil Подзадача «почва»
SAIL	Scattering by Arbitrary Inclined Leafs Модель рассеяния листьями с произвольным наклоном
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index Вегетационный индекс с поправкой на влияние почвы
SCS	Sun-Canopy-Sensor Модель Солнце-листва-сенсор
SGPI	Shortest Growing Period Index Индекс кратчайшего сезона вегетации
SPOT	Satellite Pour l’Observation de la Terre Спутник для наблюдения Земли

SRI	Space Research Institute Институт космических исследований Национальной академии наук Украины
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission Программа радарных топографических измерений на шаттлах
SVM	Support vector machine Метод опорных векторов
SZA	Solar Zenith Angle зенитный угол Солнца
TIROS	Television and InfraRed Observation Satellite Спутник для теле- и инфракрасных наблюдений
TIRS	Thermal InfraRed Sensor Тепловой инфракрасный сенсор
TD	Transformed Divergence Трансформированная дивергенция
TM	Thematic Mapper Тематический картограф
TOA	Top of atmosphere На верхней границе атмосферы
TOC	Top of canopy На верхней границе растительного покрова
TRIFFID	Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics Модель описания интерактивной листвы и флоры «сверху вниз», включающая динамику
TSAEC	Time-series analysis and ensemble classification метод анализа временных серий и совместной классификации
TSAVI	Transformed SAVI Трансформированный SAVI
UCL	Université catholique de Louvain Католический университет Нового Лёвена
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Комплект радиометров видимого и инфракрасного диапазонов
VZA	View Zenith Angle зенитный угол положения сенсора
WDRVI	Wide Dynamic Range Vegetation Index Вегетационный индекс с широким динамическим диапазоном

ЛИТЕРАТУРА

- Антонов А.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Калашиников А.В., Крамарева Л.С., Крашенинникова Ю.С., Лупян Е.А., Матвеев А.М., Прошин А.А., Флитман Е.В. (2010)* Построение объединенного каталога распределенных архивов спутниковых данных различных центров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 84–89.
- Бабяк П.В., Недолужко И.В., Фомин Е.В. (2014)* Подход к предоставлению услуг по обработке спутниковых данных в Центре коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН // Материалы научной конференции «Интернет и современное общество». 2014. С. 27–32.
- Балашов И.В., Бурцев М.Ю., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Прошин А.А., Толпин В.А. (2008)* Построение архивов результатов обработки спутниковых данных для систем динамического формирования производных информационных продуктов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 26–32.
- Балашов И.В., Бурцев М.А., Галеев А.А., Ефремов В.Ю., Крашенинникова Ю.С., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Московский А.А., Прошин А.А., Сергеева К.О., Флитман Е.В. (2010а)* Разработка эффективных высокопроизводительных решений для создания систем динамической обработки спутниковых данных и результатов их анализа // Третья международная научная конференция «Суперкомпьютерные системы и их применения» (SSA' 2010). 25–27 мая 2010. Минск. Сборник докладов, ОИПИ НАН Беларуси, 2010а. Т. 1. С. 30–34.
- Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Мазуров -мл. А.А., Мамаев А.С., Матвеев А.М., Прошин А.А. (2010б)* Организация контроля за функционированием распределенных систем сбора, обработки и распространения спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010б. Т. 7. № 4. С. 34–41.
- Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Мазуров -мл. А.А., Мамаев А.С., Матвеев А.М., Прошин А.А. (2011)* Особенности организации контроля и управления распределенных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 161–166.
- Балашов И.В., Халикова О.А., Бурцев М.А., Лупян Е.А., Матвеев А.М. (2013)* Организация автоматического получения наборов информационных продуктов из центров архивации и распространения спутниковых и метеоданных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 9–20.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. (2011а)* Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011а. Т. 8. № 4. С. 285–302.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В. (2012а)* Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012а. Т. 9. № 2. С. 9–27.

- Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Луян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. (2015a)* Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015a. Т. 12. № 5. С. 203–221.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Ильин В.О., Луян Е.А. (2004)* Синтез улучшенных сезонных изображений Северной Евразии для картографирования и мониторинга динамики растительности по данным SPOT-VEGATATION // Дистанционное зондирование поверхности Земли и атмосферы. Иркутск. ИСЗФ СО РАН. 2004. Вып. 5. С. 12–14.
- Барталев С.А., Егоров В.А., Луян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. (2011б)* Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. 2011б. Т. 35. № 1. С. 103–116.
- Барталев С.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Луян Е.А. (2011в)* Основные задачи и перспективы создания системы глобального спутникового мониторинга лесов // Лесоведение. 2011в. № 6. С. 3–15.
- Барталев С.А., Ершов Д.В., Коровин Г.Н., Котельников Р.В., Луян Е.А., Щетинский В.Е. (2010)* Основные возможности и структура информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 97–105.
- Барталев С.А., Ершов Д.В., Луян Е.А., Толпин В.А. (2012б)* Возможности использования спутникового сервиса ВЕГА для решения различных задач мониторинга наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012б. Т. 9. № 1. С. 49–56.
- Барталев С.А., Жирин В.М., Ершов Д.В. (1995)* Сравнительный анализ данных спутниковых систем «Космос-1939», SPOT и «Landsat-TM» при изучении бореальных лесов // Исследование Земли из космоса. 1995. № 1. С. 101–114.
- Барталев С.А., Златопольский А.А., Галеев А.А., Ефремов В.Ю., Луян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Флитман Е.В., Щербенко Е.В. (2009)* Автоматизированное уточнение площадей, пройденных лесными пожарами, по данным приборов HRV, HRVIR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 335–342.
- Барталев С.А., Луян Е.А. (2013)* Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
- Барталев С.А., Луян Е.А., Стыценко Ф.В., Панова О.Ю., Ефремов В.Ю. (2014)* Экспресс-картографирование повреждений лесов России пожарами по спутниковым данным Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 9–20.
- Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Луян Е.А. (2015б)* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015б. № 2. С. 83–94.
- Бурцев М.А., Антонов В.Н., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Крамарева Л.С., Луян Е.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Милехин О.Е., Прошин А.А., Соловьев В.И. (2012)* Система работы с распределенными архивами результатов обработки спутниковых данных центров приема НИЦ «Планета» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 55–76.
- Бурцев М.А., Мазуров А.А., Нейштадт И.А., Прошин А.А. (2006)* Построение архива спутниковых данных для анализа динамики растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 170–174.

- Бурцев М.А., Мамаев А.С., Прошин А.А., Флитман Е.В. (2011) Управление доступом к WEB-ресурсам в распределенных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 155–160.
- Вайникко Г.М. (1973а) Уравнения средней интенсивности излучения в разорванной облачности // Метеорологические исследования. 1973а. № 21. С. 28–37.
- Вайникко Г.М. (1973б) Транспортное приближение к средней интенсивности излучения в разорванной облачности // Метеорологические исследования. 1973б. № 21. С. 38–51.
- Вернадский В.И. (1989) Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 261 с.
- Гаврилюк Е.А., Еришов Д.В. (2013) Тематическое картографирование породной структуры лесов на основе спутниковых изображений Landsat-TM/ETM+ // Пятая Всероссийская конференция с международным участием «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». Москва, ЦЭПЛ РАН, 22–24 апреля 2013. Сборник трудов конференции. С. 112–115.
- Елагин И.Н. (1994) Времена года в лесах России. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. 272 с.
- Ефремов В.Ю., Гирина О.А., Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Матвеев А.М., Прошин А.А., Сорокин А.А., Флитман Е.В. (2012) Создание информационного сервиса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 155–170.
- Ефремов В.Ю., Златопольский А.А., Мазуров А.А. (2010) Автоматизированное оконтуривание лесной гари по данным SPOT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 35–42.
- Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Наглин Ю.Ф., Прошин А.А., Флитман Е.В. (2004) Управление и контроль работоспособности распределенных систем обработки спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 467–475.
- Жарко В.О., Барталев С.А. (2014) Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 159–170.
- Жарко В.О., Барталев С.А. (2015) Методы оценки породной структуры и продуктивности лесного покрова России по данным спутниковых наблюдений прибором MODIS // Тринадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва. ИКИ РАН, 16–20 ноября 2015. Тезисы докладов, 2015. С. 394.
- Жарко В.О., Барталев С.А., Егоров В.А. (2013) Картографирование породной структуры лесного покрова России по спутниковым данным MODIS // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: доклады V Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина (Москва, 22–24 апреля 2013 г.) – М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 144–145.
- Зуев В.Е., Титов Г.А. (1996) Современные проблемы атмосферной оптики. Том 9 – Оптика атмосферы и климат. Томск: Институт оптики атмосферы СО РАН, издательство «Спектр», 1996. 271 с.
- Кашницкий А.В., Балашов И.В., Лупян Е.А., Толпин В.А., Уваров И.А. (2015а) Создание инструментов для удаленной обработки спутниковых данных в современных информационных системах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015а. Т. 12. № 1. С. 156–170.
- Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Балашов И.В., Константинова А.М. (2016) Технология создания инструментов обработки и анализа данных сверхбольших распределенных спутниковых архивов // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 772–777.

- Кашицкий А.В., Лупян Е.А., Барталев С.А., Барталев С.С., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Стыценко Ф.В. (2015б) Оптимизация интерактивных процедур картографирования гарей в информационных системах дистанционного мониторинга природных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015б. Т. 12. № 4. С. 7–16.
- Князихин Ю.В., Маршак А.Л. (1992) Уравнение переноса радиации в растительном покрове, в Росс Ю.К., Князихин Ю.В., Кууск А.Э., Маршак А.Л., Нильсон Т.А. Математическое моделирование переноса радиации в растительных средах. Гидрометеоиздат, 1992. 197 с.
- Кобец Д.А., Балашов И.В., Данилов И.Д., Лупян Е.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А. (2015а) Использование VI-технологий для создания инструментов для анализа данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015а. Т. 12. № 4. С. 17–27.
- Кобец Д.А., Матвеев А.М., Мазуров А.А., Прошин А.А. (2015б) Организация автоматизированной многопоточковой обработки спутниковой информации в системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015б. Т. 12. № 1. С. 145–155.
- Леса СССР: карта преобладающих пород леса / подгот. отделом лесной картографии Всесоюзного государственного проектно-исследовательского института «Союзгипролесхоз»; гл. ред. Гарсия М.Г. 1:2500000. М.: ГУГК, 1990.
- Лупян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Кобец Д.А., Крашенинникова Ю.С., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. (2015а) Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015а. Т. 12. № 5. С. 53–75.
- Лупян Е.А., Балашов И.В., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Мазуров А.А., Мальцев Д.В., Матвеев А.М., Прошин А.А., Толпин В.А., Халикова О.А., Крашенинникова Ю.С. (2012а) Возможности работы с долговременным архивом данных спутников LANDSAT по территории России и приграничных стран // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012а. Т. 9. № 3. С. 307–315.
- Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Барталев С.С., Бурцев М.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Жарко В.О., Кашицкий А.В., Колбудаев П.А., Крамарева Л.С., Мазуров А.А., Оксюкевич А.Ю., Плотников Д.Е., Прошин А.А., Сенько К.С., Уваров И.А., Хвостиков С.А., Ховратович Т.С. (2016) Информационная система комплексного дистанционного мониторинга лесов «Вега-Приморье» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 11–28.
- Лупян Е.А., Барталев С.А., Ершов Д.В., Котельников Р.В., Балашов И.В., Бурцев М.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Жарко В.О., Ковганко К.А., Колбудаев П.А., Крашенинникова Ю.С., Прошин А.А., Мазуров А.А., Уваров И.А., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г., Флитман Е.В., Хвостиков С.А., Шуляк П.П. (2015в) Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015в. Т. 12. № 5. С. 222–250.
- Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. (2014б) Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014б. Т. 11. № 3. С. 215–232.
- Лупян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В. (2004) Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т. 1. С. 81–88.

- Лузян Е.А., Мазуров А.А., Назиров Р.Р., Прошин А.А., Флитман Е.В., Крашенинникова Ю.С. (2011а) Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011а. Т. 8. № 1. С. 26–43.
- Лузян Е.А., Матвеев А.М., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. (2012б) Спутниковый сервис See the Sea – инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012б. Т. 9. № 2. С. 251–262.
- Лузян Е.А., Милехин О.Е., Антонов В.Н., Крамарева Л.С., Бурцев М.А., Балашов И.В., Толпин В.А., Соловьев В.И. (2014а) Система работы с объединенными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ «ПЛАНЕТА» // Метеорология и гидрология. 2014а. № 12. С. 89–97.
- Лузян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. (2015б) Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015б. Т. 12. № 5. С. 263–284.
- Лузян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. (2011б) Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности «Вега» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011б. Т. 8. № 1. С. 190–198.
- Лузян Е.А., Саворский В.П. (2012) Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 87–97.
- Лузян Е.А., Саворский В.П., Шокин Ю.И., Алексанин А.И., Назиров Р.Р., Недолужко И.В., Панова О.Ю. (2012в) Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012в. Т. 9. № 5. С. 21–44.
- Максаковский В.П. (2003) Географическая картина мира. Кн. I: Общая характеристика мира. М.: Дрофа, 2003. 496 с.
- Маршак А.Л. (1992) Учет эффекта обратного блеска в уравнении переноса и анализ численных экспериментов, в Росс Ю.К., Князихин Ю.В., Кууск А.Э., Маршак А.Л., Нилсон Т.А. Математическое моделирование переноса радиации в растительных средах. Гидрометеиздат, 1992. 197 с.
- Носенко Ю.И., Лошкарев П.А. (2010) Единая территориально-распределенная информационная система ДЗЗ – проблемы, решения, перспективы (часть 1) // Геоматика. 2010. № 3. С. 35–43.
- Плотников Д.Е. (2012) Разработка методов дистанционной оценки растительного покрова на основе многолетних спутниковых измерений квазипериодических вариаций спектральной яркости: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01 / Плотников Дмитрий Евгеньевич. М., 2012. 158 с.
- Плотников Д.Е., Барталев С.А., Жарко В.О., Михайлов В.В., Присянникова О.И. (2011) Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 199–208.
- Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лузян Е.А. (2010) Признаки распознавания пахотных земель на основе многолетних рядов данных спутникового спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 330–341.

- Плотников Д.Е., Миклашевич Т.С., Барталев С.А. (2014)* Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
- Прошин А.А., Луян Е.А., Балашов И.В., Кашицкий А.В., Бурцев М.А. (2016)* Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 9–27.
- Росс Ю.К. (1975)* Радиационный режим и архитектура растительного покрова. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 342 с.
- Росс Ю.К., Егоров В.В. (1983)* Методические вопросы аэрокосмического зондирования растительности в оптическом диапазоне волн // Исследование Земли из Космоса. 1983. № 2. С. 58–64.
- Росс Ю.К., Маршак А.Л. (1984)* Расчет отражения солнечной радиации от растительного покрова методом Монте-Карло // Исследование Земли из Космоса. 1984. № 5. С. 58–67.
- Саворский В.П., Кашицкий А.В., Константинова А.М., Балашов И.В., Крашенинникова Ю.С., Толпин В.А., Маклаков С.М., Савченко Е.В. (2016)* Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 28–45.
- Сочилова Е.Н., Еришов Д.В. (2012)* Анализ возможности определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 277–282.
- Стыцэнко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Луян Е.А. (2013)* Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254–266.
- Сычугов И.Г., Прошин А.А. (2014)* Детектирование и документация сбоев в работе распределённых информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 233–245.
- Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Луян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. (2011а)* Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011а. Т. 8. № 3. С. 93–108.
- Толпин В.А., Балашов И.В., Луян Е.А., Савин И.Ю. (2011б)* Спутниковый сервис «Вега-Science» // Земля из космоса. 2011б. Вып. 9, Весна. С. 32–37.
- Уваров И.А., Барталев С.А. (2010)* Алгоритм и программный комплекс распознавания типов земного покрова на основе локально-адаптивной обучаемой классификации спутниковых изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 353–365.
- Уваров И.А., Матвеев А.М., Бурцев М.А., Луян Е.А., Мазуров А.А., Прошин А.А., Саворский В.П., Суднева О.А. (2014)* Организация распределенной работы с данными спутниковых гиперспектральных наблюдений для решения научных и прикладных задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 322–333.
- Флитман Е.В., Балашов И.В., Бурцев М.А., Галеев А.А., Егоров В.А., Котельников Р.В., Луян Е.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Прошин А.А. (2011)* Построение системы работы с данными прибора MODIS для решения задач мониторинга лесных пожаров и их последствий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 127–138.
- Ховратович Т.С., Барталев С.А., Жарко В.О. (2013)* Метод оценки запаса стволовой древесины на основе совместного использования продуктов данных ASAR и MODIS // Одиннадцат-

- чатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2013 г. Сборник тезисов конференции, 2013. С. 331.
- Шокин Ю.И., Антонов В.Н., Добрецов Н.Н., Кихтенко В.А., Лагутин А.А., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л., Чубаров Л.Б. (2012)* Распределенная система приема и обработки спутниковых данных Сибири и Дальнего Востока. Текущее состояние и перспективы развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 5. С. 45–54.
- Acker J., Leptoukh G. (2007)* Online analysis enhances use of NASA earth science data // Eos, Transactions American Geophysical Union. 2007. Vol. 88. No. 2. pp. 14–17.
- Arino O., Bicheron P., Achard F., Latham J., Witt R., Weber J. (2008)* GlobCover: the most detailed portrait of Earth // ESA Bulletin – European Space Agency. 2008. No. 136. pp. 24–31.
- Baccini A., Laporte N., Goetz S., Sun M., Dong H. (2008)* A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery // Environmental Research Letters. 2008. Vol. 3. No. 4. P. 045011.
- Bansal A., Murtha P., Wiart R. (1991)* An evaluation of Landsat thematic mapper data for reforestation monitoring in British Columbia // Journal of the Indian Society of Remote Sensing. 1991. Vol. 19. No. 3. pp. 163–174.
- Baret F., Guyot G., Major D. (1989)* TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation // Proceedings of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing (IGARSS'89). Vancouver (Canada), 1989. Vol. 3. pp. 1355–1358.
- Baret F., Jacquemoud S., Hanocq J. (1993)* The soil line concept in remote sensing // Remote Sensing Reviews. 1993. Vol. 7. Iss. 1. pp. 65–82.
- Bartalev S., Belward A., Ershov D., Isaev A. (2003)* A New SPOT4-VEGETATION Derived Land Cover Map of Northern Eurasia // International Journal of Remote Sensing. 2003. Vol. 24. Iss. 9. pp. 1977–1982.
- Bartalev S., Egorov V., Loupian E., Khvostikov S. (2014)* A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 5. Iss. 1. pp. 55–64.
- Bartalev S., Plotnikov D., Loupian E. (2016)* Mapping of arable land in Russia using multi-year time series of MODIS data and the LAGMA classification technique // Remote Sensing Letters. 2016. Vol. 7. Iss. 3 pp. 269–278.
- Bartholome E., Belward A. (2005)* GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data // International Journal of Remote Sensing. 2005. Vol. 26. Iss. 9. pp. 1959–1977.
- Beaudoin A., Bernier P., Guindon L., Villemaire P., Guo X., Stinson G., Bergeron T., Magnussen S., Hall R. (2014)* Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through kNN and MODIS imagery // Canadian Journal of Forest Research. 2014. Vol. 44. No. 5. pp. 521–532.
- Belward A. (ed.) (1996)* The IGBP-DIS Global 1 Km Land Cover Data Set “DISCover”: Proposal and Implementation Plans: Report of the Land Recover Working Group of IGBP-DIS. Toulouse: IGBP-DIS, 1996. 61 p.
- Bishop C. (2006)* Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, New York, USA, 2006. 730 p.
- Blackard J., Finco M., Helmer E., Holden G., Hoppus M., Jacobs D., Lister A., Moisen G., Nelson M., Riemann R., Ruefenacht B., Salajanu D., Weyermann D., Winterberger K., Brandeis T., Czaplewski R., McRoberts R., Patterson P., Tymcio R. (2008)* Mapping US forest biomass using nationwide forest inventory data and moderate resolution information // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. Iss. 4. pp. 1658–1677.
- Boschetti L., Flasse S., Brivio P. (2004)* Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 91. Iss. 3. pp. 280–292.

- Caputo B., Sim K., Furesjo F., Smola A. (2002) Appearance-based Object Recognition using SVMs: Which Kernel Should I Use? // Proc of NIPS workshop on Statistical methods for computational experiments in visual processing and computer vision. Whistler, 2002.
- Chavez. P. Jr. (1996) Image-based atmospheric corrections – revisited and improved // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. Vol. 62. No. 9. pp. 1025–1036.
- Chen Jun, Chen Jin, Liao A., Cao X., Chen L., Chen X., He C., Han G., Peng S., Lu M., Zhang W., Tong X., Mills J. (2015) Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. Vol. 103. pp. 7–27.
- Cihlar J. (2000) Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. Iss. 6–7. pp. 1093–1114.
- Civco D. (1989) Topographic normalization of Landsat thematic mapper digital imagery // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1989. Vol. 55. No. 9. pp. 1303–1309.
- Cleveland W. (1981) LOWESS: A program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression // The American Statistician. 1981. Vol. 35. No. 1. P. 54.
- Colgan M., Baldeck C., Féret J.-B., Asner G. (2012) Mapping savanna tree species at ecosystem scales using support vector machine classification and BRDF correction on airborne hyperspectral and LiDAR data // Remote Sensing. 2012. Vol. 4. No. 11. pp. 3462–3480.
- Collins M., Tett S., Cooper C. (2001) The internal climate variability of HadCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments // Climate Dynamics. 2001. Vol. 17. No. 1. pp. 61–81.
- Cox P. (2001) Description of the TRIFFID dynamic global vegetation model. Technical Note No. 24, Hadley Centre, United Kingdom Meteorological Office, Bracknell, UK, 2001. 16 p.
- Cox P, Betts R, Jones C, Spall S, Totterdell I. (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model // Nature. 2000. No. 408. pp. 184–187.
- Cramer W., Bondeau A., Woodward F., Prentice I., Betts R., Brovkin V., Cox P., Fisher V., Foley J., Friend A., Kucharik C., Lomas M., Ramankutty N., Sitch S., Smith B., White A., Young-Molling C. (2001) Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models // Global Change Biology. 2001. Vol. 7. No. 4. pp. 357–373.
- Curran P. (1989) Remote sensing of foliar chemistry // Remote Sensing of Environment. 1989. Vol. 30. Iss. 3. pp. 271–278.
- Dawson T., Curran P. (1998) A new technique for interpolating the reflectance red edge position // International Journal of Remote Sensing. 1998. Vol. 19. Iss. 11. pp. 2133–2139.
- Defourny P., Schouten L., Bartalev S., Bontemps S., Caccetta P., de Wit A., Di Bella C., Gérard B., Giri C., Gond V., Hazeu G.W., Heinemann A., Herold M., Knoop J., Jaffrain G., Latifovic R., Lin H., Mayaux P., Múcher C., Nonguierma A., Stibig H., Van Bogaert E., Vancutsem C., Bicheron P., Leroy M., Arino O. (2009) Accuracy assessment of a 300 m global land cover map: The GlobCover experience // In: 33rd International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE), May 4–8, 2009, Stresa, Italy.
- Dengsheng L., Hongli G., Shizhen H., Aijun X., Guomo Z., Huaqiang D. (2008) Pixel-based Minnaert Correction Method for Reducing Topographic Effects on a Landsat-7 ETM+ Image // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 2008. Vol. 74. No. 11. pp. 1343–1350.
- Di Gregorio A. (2005) Land cover classification system: classification concepts and user manual: LCCS. FAO Environment and natural resources series, No. 8. FAO, Rome, 2005. 208 p.
- Diner D., Beckert J., Reilly T., Bruegge C., Conel J., Kahn R., Martonchik J., Ackerman T., Davies R., Gerstl S., Gordon H., Muller J.-P., Myneni R., Sellers P., Pinty B., Verstraete M. (1998) Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) instrument description and experiment overview // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. Vol. 36. Iss. 4. pp. 1072–1087.
- Dymond J., Shepherd J. (1999) Correction of the topographic effect in remote sensing // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1999. Vol. 37. Iss. 5. pp. 2618–2619.

- Ekstrand S. (1996)* Landsat TM-based forest damage assessment: Correction for topographic effects // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. Vol. 62. No. 2. pp. 151–161.
- Engler R., Waser L., Zimmermann N., Schaub M., Berdos S., Ginzler C., Psomas A. (2013)* Combining ensemble modeling and remote sensing for mapping individual tree species at high spatial resolution // Forest Ecology and Management. 2013. Vol. 310. pp. 64–73.
- Foody G., Boyd D., Cutler M. (2003)* Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions // Remote Sensing of Environment. 2003. Vol. 85. Iss. 4. pp. 463–474.
- Friedl M., Sulla-Menashe D., Tan B., Schneider A., Ramankutty N., Sibley A., Huang X. (2010)* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. Iss. 1. pp. 168–182.
- Gao Y., Zhang W. (2008a)* Comparison test and research progress of topographic correction on remotely sensed data // Geographical Research. 2008a. Vol. 27. No. 2. pp. 467–477.
- Gao Y., Zhang W. (2008b)* Simplification and modification of a physical topographic correction algorithm for remotely sensed data // Acta Geodaet. Cartogr. Sin. 2008b. Vol. 37. pp. 89–94.
- Gitelson A. (2004)* Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of crop biophysical characteristics // Journal of Plant Physiology. 2004. Vol. 161. Iss. 2. pp. 165–173.
- Gitelson A., Merzlyak M. (1997)* Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves // International Journal of Remote Sensing. 1997. Vol. 18. Iss. 12. pp. 2691–2697.
- Gorelick N. (2013)* Google Earth Engine // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2013. Vol. 15.P. 11997.
- Govaerts Y., Verstraete M. (1998)* Raytran: A Monte Carlo ray tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. Vol. 36. Iss. 2. pp. 493–505.
- Gu D., Gillespie A. (1998)* Topographic normalization of Landsat TM images of forest based on subpixel Sun-Canopy-Sensor geometry // Remote Sensing of Environment. 1998. Vol. 64. Iss. 2. pp. 166–175.
- Hall D., Riggs G., Salomonson V., Barton J., Casey K., Chien J., DiGirolamo N., Klein A., Powell H., Tait A. (2001)* Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms. NASA GSFC, 2001.
- Hall R., Skakun R., Arsenault E., Case B. (2006)* Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume // Forest Ecology and Management. 2006. Vol. 225. Iss. 1–3. pp. 378–390.
- Hansen M., Defries R., Townshend J., Sohlberg R. (2000)* Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. Iss. 6–7. pp. 1331–1364.
- Hansen M., Potapov P., Moore R., Hancher M., Turubanova S., Tyukavina A., Thau D., Stehman S., Goetz S., Loveland T., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. Townshend J. (2013)* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. Vol. 342. Iss. 6160, pp. 850–853.
- Hantson S., Chuvieco E. (2011)* Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2011. Vol. 13. Iss. 5. pp. 691–700.
- Haxeltine A., Prentice I. (1996)* A general model for the light-use efficiency of primary production // Functional Ecology. 1996. Vol. 10. No. 5. pp. 551–561.
- Holben B., Eck T., Slutsker I., Tanre D., Buis J., Setzer A., Vermote E., Reagan J., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. (1998)* AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sensing of Environment. 1998. Vol. 66. Iss. 1. pp. 1–16.

- Houghton R., Butman D., Bunn A., Krankina O., Schlesinger P., Stone T. (2007) Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories // *Environmental Research Letters*. 2007. Vol. 2. No. 4. P. 045032.
- Hu T., Su Y., Xue B., Liu J., Zhao X., Fang J., Guo Q. (2016) Mapping Global Forest Aboveground Biomass with Spaceborne LiDAR, Optical Imagery, and Forest Inventory Data // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. Iss. 7. P. 565.
- Huang D., Knyazikhin Y., Wang W., Deering D., Stenberg P., Shabanov N., Tan B., Myneni R. (2008) Stochastic Transport Theory for Investigating the Three-Dimensional Canopy Structure from Space Measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112. Iss. 1. pp. 35–50.
- Huang W., Zhang L., Li P. (2005) An improved topographic correction approach for satellite image // *Journal of Image and Graphics*. 2005. Vol. 10. pp. 1124–1128.
- Huete A. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI) // *Remote Sensing of Environment*. 1988. Vol. 25. Iss. 3. pp. 295–309.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E., Gao X., Ferreira L. (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. Iss. 1–2. pp. 195–213.
- Jacquemoud S., Baret F. (1990) PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra // *Remote Sensing of Environment*. 1990. Vol. 34. Iss. 2. pp. 75–91.
- James M., Kalluri S. (1994) The Pathfinder AVHRR land data set: An improved coarse-resolution data set for terrestrial monitoring // *International Journal of Remote Sensing*. 1994. Vol. 15. Iss. 17. pp. 3347–3363.
- Jensen J. (1996) *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2d ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 316 p.
- Jiang Z., Huete A., Didan K., Miura T. (2008) Development of a two-band Enhanced Vegetation Index without a blue band // *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. 112. Iss. 10. pp. 3833–3845.
- Jiao Z., Zhang H., Dong Y., Liu Q., Xiao Q., Li X. (2015) An algorithm for retrieval of surface albedo from small view-angle airborne observations through the use of BRDF archetypes as prior knowledge // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. Vol. 8. Iss. 7. pp. 3279–3293.
- Jones D., Schonlau M., Welch W. (1998) Efficient global optimization of expensive black-box functions // *Journal of Global Optimization*. 1998. Vol. 13. Iss. 4. pp. 455–492.
- Jones C., Hughes J., Bellouin N., Hardiman S., Jones G., Knight J., Liddicoat S., O'Connor F., Andres R., Bell C., Boo K., Bozzo A., Butchart N., Cadule P., Corbin K., Doutriaux-Boucher M., Friedlingstein P., Gornall J., Gray L., Halloran P., Hurtt G., Ingram W., Lamarque J.-F., Law R., Meinshausen M., Osprey S., Palin E., Parsons Chini L., Raddatz T., Sanderson M., Sellar A., Schurer A., Valdes P., Wood N., Woodward S., Yoshioka M., Zerroukat M. (2011) The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations // *Geoscientific Model Development*. 2011. Vol. 4. No. 3. pp. 543–570.
- Jordan C. (1969) Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor // *Ecology*. 1969. Vol. 50. Iss. 4. pp. 663–666.
- Kaufman Y., Tanre D., Remer L., Vermote E., Chu A., Holben B. (1997) Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997. Vol. 102. Iss. D14. pp. 17051–17067.
- Klein A., Hall D., Riggs G. (1998) Improving snow cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model // *Hydrological Processes*. 1998. Vol. 12. No. 10. pp. 1723–1744.
- Knyazikhin Y., Martonchik J., Myneni R., Diner D., Running S. (1998) Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data // *Journal of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103. No. D24. pp. 32257–32276.

- Kotchenova S., Vermote E., Levy R., Lyapustin A. (2008)* Radiative Transfer codes for atmospheric correction and aerosol retrieval: intercomparison study // *Applied Optics*. 2008. Vol. 47. Iss. 13. pp. 2215–2226.
- Kotchenova S., Vermote E., Matarrese R., Klemm F. (2006)* Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: path radiance // *Applied Optics*. 2006. Vol. 45. Iss. 26. pp. 6762–6774.
- Krinner G., Viovy N., de Noblet-Ducoudre N., Ogee J., Polcher J., Friedlingstein P., Ciais P., Sitch S., Prentice I. (2005)* A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system // *Global Biogeochemical Cycles*. 2005. Vol. 19. Iss. 1.
- Latham J., Cumani R., Rosati I., Bloise M. (2014)* Global Land Cover SHARE (GLC-SHARE). Database Beta-Release Version 1.0. Global Land Cover Network: Rome, Italy, 2014.
- Latif B., Lecerf R., Mercier G., Hubert-Moy L. (2008)* Preprocessing of low-resolution time series contaminated by clouds and shadows // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. Vol. 46. Iss. 7. pp. 2083–2096.
- Li X., Strahler A. (1992)* Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the discrete crown vegetation canopy: effect of crown shape and mutual shadowing // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992. Vol. 30. Iss. 2. pp. 276–292.
- Loveland T., Zhu Z., Ohlen D., Brown J., Reed B., Yang L. (1999)* An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1999. Vol. 65. No. 9. pp. 1021–1032.
- Lu D. (2005)* Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26. Iss. 12. pp. 2509–2525.
- Lu D. (2006)* The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27. Iss. 7. pp. 1297–1328.
- Lucas R., Xiao X., Hagen S., Frohling S. (2002)* Evaluating TERRA-1 MODIS data for discrimination of tropical secondary forest regeneration stages in the Brazilian Legal Amazon // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29. Iss. 8. pp. 42-1–42-4.
- Lyapustin A., Wang Y., Xiong X., Meister G., Platnick S., Levy R., Franz B., Korkin S., Hilker T., Tucker J., Hall F., Sellers P., Wu A., Angal A. (2014)* Scientific impact of MODIS C5 calibration degradation and C6+ improvements // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2014. Vol. 7. No. 12. pp. 4353–4365.
- Matton N., Sepulcre Canto G., Waldner F., Valero S., Morin D., Inglada J., Arias M., Bontemps S., Koetz B., Defourny P. (2015)* An automated method for annual cropland mapping along the season for various globally distributed agrosystems using high spatial and temporal resolution time series // *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. Iss. 10. pp. 13208–13232.
- Mayaux P., Eva H., Gallego J., Strahler A., Herold M., Agrawal S., Naumov S., De Miranda E., Di Bella C., Ordoyne C., Kopin Y., Roy P. (2006)* Validation of the global land cover 2000 map // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006. Vol. 44. Iss. 7. pp. 1728–1739.
- Meador W., Weaver W. (1980)* Two-Stream Approximations to Radiative Transfer in Planetary Atmospheres: A Unified Description of Existing Methods and a New Improvement // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1980. Vol. 37. No. 3. pp. 630–643.
- Meier U., Ciresan D., Gambardella L., Schmidhuber J. (2011)* Better digit recognition with a committee of simple neural nets // In: *Proc. IEEE 2011 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*. 18–21 September 2011, Beijing, China. pp. 1250–1254.
- Ming-Liang G., Wen-Ji Z., Zhao-Ning G., Hui-Li G., Zheng C., Xin-Ming T. (2014)* Topographic Correction of ZY-3 Satellite Images and Its Effects on Estimation of Shrub Leaf Biomass in Mountainous Areas // *Remote Sensing*. 2014. Vol. 6. Iss. 4. pp. 2745–2764.
- Minnaert M. (1941)* The reciprocity principle in lunar photometry // *Astrophysical Journal*. 1941. Vol. 93. pp. 403–410.

- Miura T., Huete A., Yoshioka H., Holben B. (2001)* An error and sensitivity analysis of atmospheric resistant vegetation indices derived from dark target-based atmospheric correction // *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 78. Iss. 3. pp. 284–298.
- Moore R., Hansen M. (2011)* Google Earth Engine: a new cloud-computing platform for global-scale earth observation data and analysis // *American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts*. 2011. Vol. 1. P. 2.
- Moran M., Jackson R., Slater P., Teillet P. (1992)* Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output // *Remote Sensing of Environment*. 1992. Vol. 41. Iss. 2–3. pp. 169–184.
- Moss R., Edmonds J., Hibbard K., Manning M., Rose S., van Vuuren D., Carter T., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G., Mitchell J., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S., Stouffer R., Thomson A., Weyant J., Wilbanks T. (2010)* The next generation of scenarios for climate change research and assessment // *Nature*. 2010. Vol. 463. No. 7282. pp. 747–756.
- Myneni R., Asrar G. (1993)* Radiative transfer in three-dimensional atmosphere-vegetation media // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1993. Vol. 49. Iss. 6. pp. 585–598.
- Myneni R., Ramakrishna R., Nemani R., Running S. (1997)* Estimation of Global Leaf Area Index and Absorbed PAR using Radiative Transfer Models // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1997. Vol. 35. Iss. 6. pp. 1380–1393.
- Nelder J., Mead R. (1965)* A simplex method for function minimization // *Computer Journal*. 1965. Vol. 7. Iss. 4. pp. 308–313.
- Neteler M., Bowman M., Landa M., Metz M. (2012)* GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS // *Environmental Modelling and Software*. 2012. Vol. 31. pp. 124–130.
- Palmer J., Totterdell I. (2001)* Production and export in a global ocean ecosystem model // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2001. Vol. 48. Iss. 5. pp. 1169–1198.
- Penuelas J., Gamon J., Fredeen A., Merino J., Field C. (1994)* Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves // *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 48. Iss. 2. pp. 135–146.
- Penuelas J., Pinol J., Ogaya R., Filella I. (1997)* Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970) // *International Journal of Remote Sensing*. 1997. Vol. 18. Iss. 13. pp. 2869–2875.
- Pinty B., Widlowski J.-L., Taberner M., Gobron N., Verstraete M., Disney M., Gascon F., Gastellu J.-P., Jiang L., Kuusk A., Lewis P., Li X., Ni-Meister W., Nilson T., North P., Qin W., Su L., Tang S., Thompson R., Verhoef W., Wang H., Wang J., Yan G., Zang H. (2004)* Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) exercise: Results from the second phase // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2004. Vol. 109. Iss. D6.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A., Kerr Y., Sorooshian S. (1994)* Modified Soil Adjusted Vegetation Index // *Remote Sensing of Environment*. 1994. Vol. 48. Iss. 2. pp. 119–126.
- R Core Team (2015)* R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2015. (<https://www.R-project.org/>)
- Rahman H., Pinty B., Verstraete M. (1993)* Coupled Surface-Atmosphere Reflectance (CSAR) Model: 2. Semiempirical Surface Model usable with NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer data // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1993. Vol. 98. Iss. D11. pp. 20791–20801.
- Ramapriyan H. (2011)* Development, Operation and Evolution of EOSDIS – NASA’s major capability for managing Earth science data // Presented at CENDI/NFAIS Workshop on Repositories in Science & Technology: Preserving Access to the Record of Science, 30 November, 2011.
- Ramapriyan H., Behnke J., Sofinowski E., Lowe D., Esfandiari M. (2010)* Evolution of the earth observing system (EOS) data and information system (EOSDIS), in *Di Liping, Ramapriyan H. (Eds) Standard-Based Data and Information Systems for Earth Observation*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 248 p.

- Reeder D. (2002)* Topographic Correction of Satellite Images: Theory and Application. Dartmouth College. Hanover, NH, USA, 2002. 153 p.
- Rencz A. (1985)* Multitemporal analysis of Landsat imagery for monitoring forest cutovers in Nova Scotia // Canadian Journal of Remote Sensing. 1985. Vol. 11. Iss. 2. pp. 188–194.
- Richardson A., Weigand C. (1977)* Distinguishing vegetation from soil background information // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1977. Vol. 43. pp. 1541–1552.
- Rondeaux G., Steven M., Baret F. (1996)* Optimization of soil-adjusted vegetation indices // Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 55. Iss. 2. pp. 95–107.
- Ross J. (1981)* The radiation regime and architecture of plant stands. Dr W. Junk Publishers. Hague-Boston-London, 1981. 388 p.
- Roustant O., Ginsbourger D., Deville Y. (2012)* DiceKriging, DiceOptim: Two R packages for the analysis of computer experiments by kriging-based metamodeling and optimization // Journal of Statistical Software. 2012. Vol. 51. Iss. 1.
- Roy D., Qin Y., Kovalskyy V., Vermote E., Ju J., Egorov A., Hansen M., Kommareddy I., Yan L. (2014)* Conterminous United States demonstration and characterization of MODIS-based Landsat ETM+ atmospheric correction // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140. pp. 433–449.
- Santoro M., Beaudoin A., Beer C., Cartus O., Fransson J., Hall R., Pathe C., Schmullius C., Schepaschenko D., Shvidenko A., Thurner M., Wegmüller U. (2015)* Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 168. pp. 316–334.
- Savitzky A., Golay M. (1964)* Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures // Analytical Chemistry. 1964. Vol. 36. No. 8. pp. 1627–1639.
- Scepan J. (1999)* Thematic validation of high-resolution global land-cover data sets // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1999. Vol. 65. No. 9. pp. 1051–1060.
- Schaaf C., Gao F., Strahler A., Lucht W., Li X., Tsang T., Strugnell N., Zhang X., Jin Y., Muller J.-P., Lewis P., Barnsley M., Hobson P., Disney M., Roberts G., Dunderdale M., Doll C., d'Entremont R., Hu B., Liang S., Privette J., Roy D. (2002)* First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS // Remote Sensing of Environment. 2002. Vol. 83. Iss. 1–2. pp. 135–148.
- Schaepman-Strub G., Schaepman M., Painter T., Dangel S., Martonchik J. (2006)*. Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies // Remote Sensing of Environment. 2006. Vol. 103. Iss. 1. pp. 27–42.
- Schepaschenko D., McCallum I., Shvidenko A., Fritz S., Kraxner F., Obersteiner M. (2011)* A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information // Journal of Land Use Science. 2011. Vol. 6. Iss. 4. pp. 245–259.
- Sellers P. (1985)* Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration // International Journal of Remote Sensing. 1985. Vol. 6. Iss. 8. pp. 1335–1372.
- Sellers P., Tucker C., Collatz C., Los O., Justice C., Dazlich D., Randall D. (1994)* A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI // International Journal of Remote Sensing. 1994. Vol. 15. Iss. 17. pp. 3519–3545.
- Shabanov N., Huang D., Knyazikhin Y., Dickinson R., Myneni R. (2007)* Stochastic Radiative Transfer Model for Mixture of Discontinuous Vegetation Canopies // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2007. Vol. 107. Iss. 2. pp. 236–262.
- Shabanov N., Knyazikhin Y., Baret F., Myneni R. (2000)* Stochastic Modeling of Radiation Regime in Discontinuous Vegetation Canopies // Remote Sensing of Environment. 2000. Vol. 74. Iss. 1. pp. 125–144.
- Shabanov N., Vargas M., Miura T., Sei A., Danial A. (2015)* Evaluation of the Performance of Suomi NPP VIIRS Top of Canopy Vegetation Indices over AERONET Sites // Remote Sensing of Environment. 2015. vol. 162. pp. 29–44.

- Shabanov N., Wang Y., Buermann W., Dong J., Hoffman S., Smith G., Tian Y., Knyazikhin Y., Myneni R. (2003)* Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 85. Iss. 4. pp. 410–423.
- Shultis J., Myneni R. (1988)* Radiative transfer in vegetation canopies with an isotropic scattering // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 1988. Vol. 39. Iss. 2. pp. 115–129.
- Simard M., Pinto N., Fisher J., Baccini A. (2011)* Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2011. Vol. 116. Iss. G4.
- Simpson T., Mauery T., Korte J., Mistree F. (2001)* Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization // *AIAA journal*. 2001. Vol. 39. No. 12. pp. 2233–2241.
- Sitch S., Huntingford C., Gedney N., Levysz P., Lomas M., Piao S., Betts R., Ciais P., Cox P., Friedlingstein P., Jonesk C., Prentice I., Woodward F. (2008)* Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs) // *Global Change Biology*. 2008. Vol. 14. Iss. 9. pp. 2015–2039.
- Sitch S., Smith B., Prentice I., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J., Levis S., Lucht W., Sykes M., Thonicke K., Venevsky S. (2003)* Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model // *Global Change Biology*. 2003. Vol. 9. Iss. 2. pp. 161–185.
- Skakun S., Basarab R. (2014)* Reconstruction of Missing Data in Time-Series of Optical Satellite Images Using Self-Organizing Kohonen Maps // *Journal of Automation and Information Sciences*. 2014. Vol. 46. Iss. 12. pp. 19–26.
- Smith J., Lin T., Ranson K. (1980)* The Lambertian assumption and Landsat data // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1980. Vol. 46. No. 9. pp. 1183–1189.
- Soenen S., Peddle D., Coburn C. (2005)* SCS+C: A modified Sun-Canopy-Sensor topographic correction in forested terrain // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. Vol. 43. Iss. 9. pp. 2148–2159.
- Stoyan D., Kendall W., Mecke J. (1995)* Stochastic geometry and its applications. Wiley series in probability and statistics, 2nd ed. New York: Wiley, 1995. 436 p.
- Sulla-Menashe D., Friedl M., Krankina O., Baccini A., Woodcock C., Sibley A., Sun G., Kharuk V., Elsakov V. (2011)* Hierarchical mapping of Northern Eurasian land cover using MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. 2011. Vol. 115. Iss. 2. pp. 392–403.
- Teillet P., Guindon B., Goodenough D. (1982)* On the slope-aspect correction of multispectral scanner data // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1982. Vol. 8. Iss. 2. pp. 84–106.
- Tian Q., Zhao C., Tong Q., Pu R., Guo X. (2001)* Spectroscopic determination of wheat water status using 1650–1850 nm spectral absorption features // *International Journal of Remote Sensing*. 2001. Vol. 22. Iss. 12. pp. 2329–2338.
- Titov G. (1990)* Statistical description of radiation transfer in clouds // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1990. Vol. 47. No. 1. pp. 24–38.
- Tucker C. (1979)* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8. Iss. 2. pp. 127–150.
- Tucker C. (1996)* History of the use of AVHRR data for land applications, in *D'Souza G., Belward A., Malingreau J.-P. (Eds.) Advances in the Use of NOAA AVHRR Data for Land Application*. Springer, Netherlands, 1996. 492 p.
- Vancutsem C., Marinho E., Kayitakire F., See L., Fritz S. (2012)* Harmonizing and combining existing land cover/land use datasets for cropland area monitoring at the African continental scale // *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5. Iss. 1. pp. 19–41.
- Vapnik V. (2000)* The nature of statistical learning theory. Springer-Verlag, New York, 2000. 314 p.
- Venevsky S., Maksyutov S. (2007)* SEVER: A modification of the LPJ global dynamic vegetation model for daily time step and parallel computation // *Environmental Modelling and Software*. 2007. Vol. 22. No. 1. pp. 104–109.

- Verhoef W. (1984)* Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model // *Remote Sensing of Environment*. 1984. Vol. 16. Iss. 2. pp. 125–141.
- Vermote E., El Saleous N. (2006)* Operational atmospheric correction of MODIS visible to middle infrared land surface data in the case of an infinite lambertian target, in *Qu J., Gao W., Kafatos M., Murphy R., Salomonson V. (Eds.) Earth Science Satellite Remote Sensing, Vol. 1: Science and Instruments*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 418 p.
- Vermote E., El Saleous N., Justice C. (2002)* Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: First results // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 83. Iss. 1–2. pp. 97–111.
- Vermote E., El Saleous N., Justice C., Kaufman Y., Privette J., Remer L., Roger J., Tanré D. (1997a)* Atmospheric correction of visible to middle-infrared EOS-MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997a. Vol. 102. Iss. D14. pp. 17131–17141.
- Vermote E., Tanre D., Deuze J., Herman M., Morcette J. (1997b)* Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1997b. Vol. 35. Iss. 3. pp. 675–686.
- Vermote E., Vermeulen A. (1999)* Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Algorithm Theoretical Background Document v. 4, 1999. 107 p.
- Vincini M., Reeder D., Frazzi E. (2002)* An Empirical Topographic Normalization Method for Forest TM Data // *Proceedings of the 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Canada, 24–28 June 2002. Vol. 4. pp. 2091–2093.
- Waldner F., Fritz S., Di Gregorio A., Plotnikov D., Bartalev S., Kussul N., Gong P., Thenkabail P., Hazeu G., Klein I., Löw F., Miettinen J., Dadhwal V., Lamarche C., Bontemps C., Defourny P. (2016a)* A Unified Cropland Layer at 250 m for Global Agriculture Monitoring // *Data*. 2016a. Vol. 1. Iss. 1. P. 3.
- Waldner F., De Aballeyra D., Santiago V., Zhang M., Wu B., Plotnikov D., Bartalev S., Lavreniuk M., Skakun S., Kussul N., Le Maire G., Dupuy S., Jarvis I., Defourny P. (2016b)* Towards a set of agrosystem-specific cropland mapping methods to address the global cropland diversity // *International Journal of Remote Sensing*. 2016b. Vol. 37. Iss. 14. pp. 3196–3231.
- Wang D., Morton D., Masek J., Wu A., Nagol J., Xiong X., Levy R., Vermote E., Wolfe R. (2012)* Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 119. pp. 55–61.
- Wanner W., Strahler A., Hu B., Lewis P., Muller J.-P., Li X., Schaaf C., Barnsley M. (1997)* Global retrieval of bidirectional reflectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: Theory and algorithm // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1997. Vol. 102. Iss. D14. pp. 17143–17161.
- Wilson B., Lister A., Riemann R. (2012)* A nearest-neighbor imputation approach to mapping tree species over large areas using forest inventory plots and moderate resolution raster data // *Forest Ecology and Management*. 2012. Vol. 271. pp. 182–198.
- Woodcock C., Macomber S., Pax-Lenney M., Cohen W. (2001)* Monitoring large areas for forest change using Landsat: Generalization across space, time and Landsat sensors // *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. 78. Iss. 1–2. pp. 194–203.
- Yang W., Shabanov N., Huang D., Wang W., Dickinson R., Nemani R., Knyazikhin Y., Myneni R. (2006)* Analysis of Leaf Area Index Products from Combination of MODIS Terra and Aqua Data // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 104. Iss. 3. pp. 297–312.

Для заметок

Для заметок

Научное издание

С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян,
Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов

**СПУТНИКОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ
РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА РОССИИ**

Подписано в печать 28.11.2016

Формат 70×100/16

Бумага офсетная 80 г/м²

Печать офсетная

Усл. печ. л. 12

Тираж 500

Издатель: Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)
117997, г. Москва, Профсоюзная ул., 84/32

Компьютерная верстка: Бушмелева Е.В.
Дизайн обложки: Захаров А.Н.

ООО «ИИА «Пресс-Меню»
г. Москва, ул. Малахитовая, д. 21
Тел. 8 925 500 71 37
press-menu@mail.ru

Отпечатано в типографии ОАО «Подольская фабрика офсетной печати»
г. Подольск, Революционный проспект, 80/42,
тел. 8 (4967) 69-97-22, 8 (4967) 69-97-29
e-mail: offset@podolsk.ru